



DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA

# Delimitación de superficies regadas a partir de técnicas geográficas: aplicación en la cuenca alta del Guadiana

Tesis Doctoral presentada por Manuel Bea Martínez

Dirigida por

José Antonio Rodríguez Esteban  
Profesor titular de Análisis Geográfico Regional de la  
Universidad Autónoma de Madrid

Salomón Montesinos Aranda  
Profesor asociado de Sistemas de Información  
Geográfica en la Universidad de Castilla La Mancha  
y Director de GEOSYS SL



Mis padres, cuando eran jóvenes y, pensando más en la familia que estaban formando, decidieron dejar de lado sus Tesis doctorales y tomar otros caminos en su vida profesional. Esta Tesis, se la dedico a ellos, que me lo han dado todo, como agradecimiento sincero a todos sus esfuerzos.

A mis hermanos Félix y Fuensanta.





Esta Tesis Doctoral es el resultado de un trabajo de muchos años, iniciado desde la ilusión y el compromiso de un estudiante a quien, recién salido de la universidad, se le presentó la posibilidad de implicarse en el estudio de problemas y dinámicas territoriales y ambientales, muy cercanas a sus inquietudes; y en el que he podido seguir profundizando a lo largo de mi trayectoria profesional. En esta línea, este trabajo de investigación trata de ser una aportación que ayude a seguir avanzando hacia la sostenibilidad hídrica y ambiental en la Cuenca Alta del Guadiana.

Durante los últimos 10 años, y en especial, durante el desarrollo más directo de la investigación, debo agradecer a muchas personas su ayuda y apoyo, aunque en estos agradecimientos me centre en aquellos que han tenido un papel principal.

Debo comenzar con mis codirectores, Salomón Montesinos y José Antonio Rodríguez Esteban.

Salomón, fue mi tutor técnico durante el año en que realicé mi proyecto de fin de carrera, en GEOSYS, empresa de la que es Director, y en la que llevo trabajando desde entonces. Al poco tiempo de comenzar, un día me llamó a su despacho y tuvimos una conversación en la que recuerdo que me acabó dando tres consejos: que perfeccionase los idiomas todo lo que pudiera, que me plantease el hecho, a medio plazo, de escribir una Tesis doctoral, y que aprovecharse los años que tenía por delante, porque los veintitantos son una de las mejores etapas de la vida. Al principio hice más caso a la última recomendación, aunque al final he acabado preparando esta Tesis, para lo que siempre he contado con toda su colaboración. En todo este tiempo, Salomón ha sido una persona muy exigente y, al mismo tiempo, muy comprensiva conmigo, y hemos construido una relación muy cercana, tanto en el ámbito profesional como en el personal, que se aleja de los cánones de la de empleado-jefe. Esta Tesis doctoral es una continuación del trabajo que él comenzó con su tesina doctoral hace más de veinte años, y que supuso la primera aplicación de las técnicas de teledetección para la cuantificación de riegos dentro de la Llanura Manchega.

José Antonio fue la primera persona que me explicó durante la carrera el funcionamiento e interés de los Sistemas de Información Geográfica. Posteriormente, volvió a ser mi profesor en los cursos de doctorado y dirigió mi trabajo para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados, basado en la aplicación de técnicas de evaluación multicriterio y multiobjetivo para el modelado prospectivo de cambios en los usos del suelo. Su apoyo y su conocimiento de estas metodologías de análisis espacial me permitieron profundizar en un campo hasta entonces desconocido para mí. Además, ahora me doy cuenta que trabajando con él, he ido aprendiendo y me he ido empapando de otros muchos conceptos, sobre todo relacionados con la importancia de aplicar las técnicas geográficas y procesos de análisis sin perder nunca las referencias y el contexto territorial. Pero

incluso por encima de su aportación académica, debo agradecerle su implicación, sus comentarios siempre inteligentes y apropiados y sobre todo, su trato de amigo.

La profesora Virginia Rubio Fernández fue quien, por primera vez, me habló en detalle acerca de los problemas hídricos de la Cuenca Alta del Guadiana, dentro de sus clases sobre ordenación del territorio. Posteriormente, me dio la oportunidad de realizar, y además tuteló, mi proyecto fin de carrera acerca de la estimación de la evolución de herbáceos de alta dotación en los acuíferos sobreexplotados en este ámbito territorial. Siempre ha estado disponible para ayudarme y darme consejo cuando lo he necesitado.

Debo hacer una mención especial a la Confederación Hidrográfica del Guadiana, ya que este organismo ha colaborado y desde luego, me ha dado todas las facilidades posibles para la realización de esta Tesis. En este sentido, mi primer agradecimiento es para el Comisario de Aguas, Samuel Moraleda, que ha permitido el empleo de diversos datos y material sin los que la investigación no habría sido posible.

César Morugán, jefe de Servicio de Hidrología, ha sido el principal valedor de esta colaboración, por lo que debo agradecerle su confianza y apoyo. Es un modelo de persona con la que trabajar, por su capacidad, implicación, visión y nivel de exigencia, a lo que además une un carácter cercano y amigable.

También quiero mencionar a Alberto Benítez, técnico superior de la Confederación, con quién realicé diversos trabajos basados en la aplicación de técnicas de teledetección mientras fue jefe del Servicio de Aguas Subterráneas. De esta época, aún trato de conservar su ánimo e ilusión a la hora de acometer un trabajo, y su visión y capacidad de enfoque para abordar los estudios de una forma progresiva y sin dejar de avanzar.

Por otro lado, también quiero acordarme de Alberto Fernández Lop, de WWF- España, trabajador incansable y persona muy ligada a la conservación de los ecosistemas de la Cuenca Alta del Guadiana: por la diversa documentación que me ha facilitado y por sus aportaciones e impresiones acerca de los problemas existentes en la zona.

A mis compañeros en GEOSYS, por su ayuda y por todos los buenos ratos que hemos pasado. En especial, a mi amigo Alberto Holguín, con quien he realizado la mayor parte del trabajo de campo, y a quién he atormentado con mis ideas para los distintos desarrollos metodológicos en que se centra esta tesis. La práctica totalidad de fotografías que acompañan al texto han sido tomadas por él.

A mis amigos y familia, por perdonarme por todo el tiempo que no he podido dedicarles.

A Conchita, que ha sido y es, mi principal apoyo y motivación.

Esta Tesis Doctoral solo ha sido posible gracias al apoyo y permiso expreso de la Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHG).

Las imágenes de satélite e imágenes aéreas, los datos de campo y los restantes datos auxiliares han sido recopilados, estructurados y procesados en el marco de varias asistencias técnicas realizadas por la empresa GEOSYS durante los años 2007, 2008 y 2009, con objeto de evaluar la distribución de superficies regadas dentro de los acuíferos sobreexplotados de la cuenca alta del Guadiana.

Todo este conjunto de datos ha sido cedido por parte de la Comisaría de Aguas de la Confederación Hidrográfica del Guadiana, para su empleo en esta Tesis Doctoral. El desarrollo metodológico expuesto ha sido diseñado, elaborado y validado por el autor, aunque ninguno de estos pasos habría sido posible sin la colaboración directa de esta Administración.

Cualquier uso de la información contenida en este documento, más allá de la copia privada, requiere que se cite la fuente y la autoría. En el caso de que se citen cifras y cuantificaciones de superficies regadas, se debería mencionar que su obtención ha sido posible gracias a los trabajos de seguimiento y control que viene realizando la Comisaría de Aguas de la CHG. La obtención de datos ajustados acerca de la extensión de las superficies regadas dentro de los acuíferos sobreexplotados de la cuenca alta del Guadiana ha sido solamente posible dentro del marco previo establecido por la línea de trabajo que la Comisaría de Aguas de la Confederación Hidrográfica del Guadiana viene desarrollando al respecto.

Los mapas digitales de distribución de cultivos regados obtenidos a través del trabajo de investigación desarrollado son propiedad de la Confederación Hidrográfica del Guadiana, y se encuentran integrados dentro de su Sistema de Información Geográfica corporativo.

Las opiniones y valoraciones realizadas dentro de esta Tesis son responsabilidad exclusiva de su autor.





“Sin embargo, año tras año, al llegar la primavera, el cauce reverdecía, las junqueras se estiraban de nuevo, las carrizas se revestían de hojas lanceoladas y las mazorcas de las espadañas reventaban inundando los campos con las blancas pelusas de los vilanos. Había llegado el momento de la veda, y el tío Ratero, respetando el celo de las ratas, se recogía en su cueva hasta el próximo otoño.

En ocasiones si la perra hacía una muestra y él observaba a la entrada de la hura cuatro yerbajos secos, la disuadía: –Está anidando, vamos–. La perra se retiraba sin oponer resistencia. Entre ella, el Nini y el tío Ratero existía una tácita comprensión. Los tres sabían que destruyendo las camadas no conseguirían otra cosa que quedarse sin pan.”

(Miguel Delibes, *Las ratas*)

“En marzo volvieron los gitanos. Esta vez llevaban un catalejo y una lupa del tamaño de un tambor, que exhibieron como el último descubrimiento de los judíos de Ámsterdam. Sentaron una gitana en un extremo de la aldea e instalaron el catalejo a la entrada de la carpa. Mediante el pago de cinco reales, la gente se asomaba al catalejo y veía a la gitana al alcance de su mano. –La ciencia ha eliminado las distancias–, pregonaba Melquíades. –Dentro de poco, el hombre podrá ver lo que ocurre en cualquier lugar de la Tierra, sin moverse de su casa–.”

(Gabriel García Márquez, *Cien años de soledad*)



# **TABLA DE CONTENIDOS**





## **TABLA DE CONTENIDOS**

### **DESARROLLO METODOLÓGICO (MEMORIA DESCRIPTIVA)**

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO	7
3. DISEÑO METODOLÓGICO Y RECOPIACIÓN DE DATOS	41
4. DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA DE CULTIVOS REGADOS	81
4.1. Distribución de cultivos herbáceos regados en verano	85
4.2. Distribución de cultivos herbáceos regados en primavera	120
4.3. Distribución del viñedo en regadío	145
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	183
5.1. Cuantificación de superficies regadas durante el año 2009	184
5.2. Validación de resultados	197
6. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES	231

### **APÉNDICE**

A.1. TERRITORIO: LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA	A.1
A.2. AGUA: PROBLEMÁTICA EN LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA	A.43
A.3. GESTIÓN HIDROLÓGICA: EVOLUCIÓN Y PERSPECTIVA	A.95

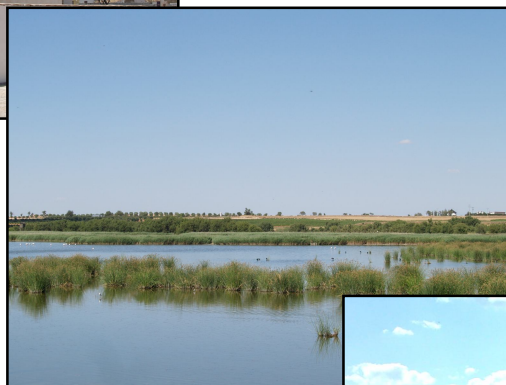
### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

### **LISTADO DE ABREVIATURAS**



# Delimitación de superficies regadas a partir de técnicas geográficas: aplicación en la cuenca alta del Guadiana

## DESARROLLO METODOLÓGICO



**MANUEL BEA MARTÍNEZ**

**Codirectores:**

**Dr. José Antonio Rodríguez Esteban**

**Dr. Salomón Montesinos Aranda**



**DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA**

IMÁGENES DE LA PORTADA DE LA MEMORIA DESCRIPTIVA DEL DESARROLLO  
METODOLÓGICO

- 1.- Molinos de viento en Campo de Criptana, al fondo la Llanura Manchega.
- 2.- Vista de la Laguna del Pueblo, en Pedro Muñoz.
- 3.- Cultivo de ajo regado en primavera mediante un sistema de pivot.

## ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
1.1. CONTEXTO GENERAL.....	1
1.2. SELECCIÓN DEL ÁMBITO DE ESTUDIO .....	2
1.3. ESTRUCTURA Y CONCEPTUALIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.4. OBJETIVOS.....	6
2. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	7
2.1. INTRODUCCIÓN: CONCEPTOS SOBRE LA CUANTIFICACIÓN DE SUPERFICIES REGADAS.....	7
2.2. USO DE TÉCNICAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA CUANTIFICACIÓN DE SUPERFICIES REGADAS.....	13
2.2.1. Teledetección y agricultura.....	14
2.2.2. Uso de la teledetección para la cuantificación de superficies regadas.....	20
2.2.3. Análisis territorial basado en la integración de información geográfica .....	32
2.3. ESTIMACIONES DE SUPERFICIE REGADA DENTRO DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA.....	34
3. DISEÑO METODOLÓGICO Y RECOPIACIÓN DE DATOS .....	41
3.1. SEGMENTACIÓN DE CULTIVOS REGADOS.....	43
3.2. CAMPAÑAS DE CAMPO.....	48
3.2.1. Diseño de las campañas de campo.....	48
3.2.2. Desarrollo y datos recogidos en las campañas de campo .....	55
3.3. ADQUISICIÓN DE DATOS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA .....	67
3.3.1. Características de los datos adquiridos .....	67
3.3.2. Preproceso de las imágenes .....	75
3.4. RECOPIACIÓN DE OTROS DATOS GEOGRÁFICOS.....	78
4. DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA DE CULTIVOS REGADOS.....	81
4.1. DISTRIBUCIÓN DE CULTIVOS HERBÁCEOS REGADOS EN VERANO .....	85
4.1.1. Análisis visual de la respuesta espectral de los cultivos en regadío.....	86
4.1.2. Elaboración del mapa de superficie regada .....	97
4.1.3. Mapa de cultivos herbáceos regados durante el verano de 2009 .....	103
4.2. DISTRIBUCIÓN DE CULTIVOS HERBÁCEOS REGADOS EN PRIMAVERA .....	120
4.2.1 Discriminación de ajo en regadío .....	123
4.2.2 Discriminación de leguminosas en regadío.....	125

4.2.3. <i>Discriminación de cereal en regadío</i> .....	126
4.3. DISTRIBUCIÓN DEL VIÑEDO EN REGADÍO.....	145
4.3.1. <i>Elaboración del mapa de distribución del viñedo</i> .....	146
4.3.2. <i>Segmentación territorial para el viñedo</i> .....	151
4.3.3. <i>Discriminación de la existencia de viñedos regados</i> .....	153
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	183
5.1. CUANTIFICACIÓN DE SUPERFICIES REGADAS DURANTE EL AÑO 2009 .....	184
5.1.1. <i>Cuantificación de la superficie regada en la primavera de 2009</i> .....	187
5.1.2. <i>Cuantificación de la superficie de cultivos herbáceos regada en verano y otoño de 2009</i> .....	190
5.1.3. <i>Cuantificación de la superficie de leñosos regados en 2009</i> .....	193
5.2. VALIDACIÓN DE RESULTADOS .....	197
5.2.1. <i>Validación del mapa de superficie regada en la primavera de 2009</i> .....	198
5.2.2. <i>Validación del mapa de superficie de cultivos herbáceos regada en verano y otoño de 2009</i> .....	202
5.2.3. <i>Validación del mapa de superficie de viña regada en 2009</i> .....	207
6. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES .....	231
6.1. SOBRE LA METODOLOGÍA .....	232
6.2. SOBRE LA CUANTIFICACIÓN DE SUPERFICIES REGADAS .....	238
6.2.1. <i>Sobre la cuantificación de superficie regada en el año 2009</i> .....	238
6.2.2. <i>Comparación de cifras de cuantificación de superficie regada</i> .....	244
6.3. SOBRE LA UTILIDAD DE LA CUANTIFICACIÓN DE SUPERFICIES REGADAS EN LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA .....	249

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. RECOPIACIÓN DE DATOS DE ESTIMACIÓN DE SUPERFICIES REGADAS EN LOS ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS .....	36
TABLA 2. CULTIVOS CUBIERTOS POR LAS RECOMENDACIONES DEL SIAR, EN LA ZONA DE ESTUDIO, DURANTE 2009 .....	44
TABLA 3. DESCRIPCIÓN DE LA LEYENDA TEMÁTICA DEL MAPA DE CULTIVOS EN REGADÍO .....	45
TABLA 4. CALENDARIO FENOLÓGICO DE LOS PRINCIPALES CULTIVOS EN REGADÍO DENTRO DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	47
TABLA 5. DATOS RECOGIDOS EN LA CAMPAÑA DE CAMPO DE PRIMAVERA POR TIPO DE CULTIVO. ....	58
TABLA 6. DATOS SOBRE LA CAMPAÑA DE CAMPO DE VERANO PARA HERBÁCEOS, POR TIPO DE CULTIVO .....	60
TABLA 7. DATOS SOBRE LA CAMPAÑA DE CAMPO DE OTOÑO, POR TIPO DE CULTIVO .....	61
TABLA 8. DATOS DE LA CAMPAÑA DE CAMPO DE LEÑOSOS DE 2008, POR TIPO DE CULTIVO. ....	63
TABLA 9. SUPERFICIE MUESTREADA EN LA CAMPAÑA DE CAMPO PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA DE CULTIVOS LEÑOSOS EN REGADÍO DE 2009. ....	65
TABLA 10. SUPERFICIE MUESTREADA EN LA CAMPAÑA DE CAMPO PARA EL PROCESO DE VALIDACIÓN. ....	65
TABLA 11. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SATÉLITE LANDSAT 5 .....	68
TABLA 12. IMÁGENES ADQUIRIDAS DEL SATÉLITE LANDSAT .....	69
TABLA 13. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SATÉLITE SPOT 5 .....	70
TABLA 14. IMÁGENES ADQUIRIDAS DEL SATÉLITE SPOT .....	71
TABLA 15. RECOPIACIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITE DE AÑOS ANTERIORES .....	72
TABLA 16. RELACIÓN ENTRE LAS FASES GENERALES DE LA METODOLOGÍA Y LOS PROCESOS EN QUE SE DIVIDEN LAS APROXIMACIONES METODOLÓGICAS PARA LOS DIFERENTES GRUPOS DE CULTIVOS .....	84
TABLA 17. MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA LA CLASIFICACIÓN MEDIANTE FOTOINTERPRETACIÓN ASISTIDA .	113
TABLA 18. ERRORES DE COMISIÓN Y OMISIÓN POR CULTIVO PARA CADA UNA DE LAS CLASIFICACIONES PARCIALES PROPUESTAS .....	113
TABLA 19. CRITERIOS PARA LA DEFINICIÓN DEL ÁRBOL JERÁRQUICO DE DECISIÓN .....	115
TABLA 20. MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA LA UNIÓN DE CLASIFICACIONES MULTIESPECTRALES .....	116
TABLA 21. MATRIZ DE CONFUSIÓN PARA EL MAPA RESULTANTE DE LA INTEGRACIÓN DE LAS DIFERENTES APROXIMACIONES PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CUTIVOS .....	117
TABLA 22. POSIBILIDADES CONTEMPLADAS EN EL ANÁLISIS DEL HISTORIAL DE RIEGO DE CADA PARCELA DE CEREAL .....	136
TABLA 23. AGRUPACIÓN SEGÚN EL HISTORIAL DE RIEGO DE CADA PARCELA DE CEREAL EN LA UH 04.04 .....	137
TABLA 24. VALORES MEDIOS MEDIDOS EN CAMPO PARA CADA TIPOLOGÍA DE RIEGO/SECANO .....	139
TABLA 25. SUPERFICIE DE VIÑEDO EN 2009. ....	150
TABLA 26. ZONIFICACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DE LA VIÑA EN REGADÍO .....	152
TABLA 27. ASIGNACIÓN INICIAL DE VALORES NUMÉRICOS AL MAPA DE CAMBIO DE USOS .....	158
TABLA 28. RELACIÓN ENTRE EL CRITERIO DE ELEMENTOS RELACIONADOS CON LA PRESENCIA DE RIEGO Y EL MAPA DE VIÑA .....	160

TABLA 29. RELACIÓN ENTRE EL MAPA DE VIÑA REGADA EN 2008 Y LAS DIFERENTES CATEGORÍAS ASOCIADAS AL CRITERIO DE ELEMENTOS RELACIONADOS CON LA PRESENCIA DE RIEGO.....	161
TABLA 30. PORCENTAJE DE VIÑA REGADA EN 2008 PARA CADA CATEGORÍA DEL CRITERIO DE CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO.....	162
TABLA 31. RELACIÓN ENTRE EL MAPA DE ÍNDICE DE VEGETACIÓN PARA VERANO DE 2008 Y LAS DIFERENTES CATEGORÍAS ASOCIADAS AL CRITERIO DE CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO .....	164
TABLA 32. RELACIÓN ENTRE EL MAPA DE ÍNDICE DE VEGETACIÓN PARA VERANO DE 2008 Y LAS DIFERENTES CATEGORÍAS ASOCIADAS AL CRITERIO DE CAMBIOS EN EL USO DEL SUELO, POR GRUPOS.....	165
TABLA 33. VALORES NUMÉRICOS ASOCIADOS AL CRITERIO DE CAMBIO DE USO. ....	166
TABLA 34. MODIFICACIONES FINALES DE LOS VALORES DE LOS CRITERIOS REALIZADAS EN FUNCIÓN DE LA PROBABILIDAD DE RIEGO OBSERVADA EN 2008. ....	167
TABLA 35. ESCALA PARA LA COMPARACIÓN DE CRITERIOS SEGÚN EL MÉTODO DE SAATY.....	168
TABLA 36. COMPARACIÓN POR PARES PARA LA DEFINICIÓN DE VALORES DE PONDERACIÓN PARA LOS CRITERIOS.....	169
TABLA 37. ALTERNATIVAS CONTEMPLADAS PARA LA SELECCIÓN DE CONDICIONES DE APLICACIÓN DEL MÉTODO DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO .....	174
TABLA 38. ESQUEMA DE COMPARACIÓN ENTRE IMÁGENES PARA EL CÁLCULO DEL PARÁMETRO DE ROC .....	175
TABLA 39. RESULTADOS DEL ENSAYO PARA LA SELECCIÓN DE CRITERIOS.....	176
TABLA 40. VALORES UMBRALES PARA LA DISCRIMINACIÓN EL RIEGO PARA EMC POR REGRESIÓN MULTILOGÍSTICA.....	179
TABLA 41. CUANTIFICACIÓN DE SUPERFICIES REGADAS EN 2009 DENTRO DE LOS ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA .....	185
TABLA 42. ESTIMACIÓN DE CONSUMO POR RIEGO EN 2009 DENTRO DE LOS ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA .....	186
TABLA 43. SUPERFICIE DE CULTIVOS REGADOS EN PRIMAVERA PARA CADA UNIDAD HIDROGOLÓGICA....	187
TABLA 44. ESTIMACIÓN DE LA DOTACIÓN MEDIA SIAR PARA EL CEREAL EN LA UH 04.04.....	188
TABLA 45. ESCENARIOS DE CONSUMO POR UH SEGÚN DOTACIONES DE CONSUMO.....	189
TABLA 46. DOTACIONES Y CONSUMO ESTIMADO DENTRO DEL TOTAL DE LA UNIDAD DE LA MANCHA OCCIDENTAL .....	192
TABLA 47. DOTACIONES Y CONSUMO ESTIMADO DENTRO DE LA UNIDAD DE LA ZONA REGABLE DE PEÑARROYA .....	192
TABLA 48. DOTACIONES Y CONSUMO ESTIMADO EN EL P.S. DEL CAMPO DE MONTIEL .....	193
TABLA 49. RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE VIÑA EN REGADÍO POR ZONA DE SEGMENTACIÓN .....	194
TABLA 50. ESTIMACIÓN DE LA DOTACIÓN MEDIA SIAR PARA LA VIÑA EN LOS ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS .....	196
TABLA 51 CONSUMO ESTIMADO PARA LA VIÑA EN FUNCIÓN DE SU SISTEMA DE PLANTACIÓN Y DESARROLLO FOLIAR .....	197
TABLA 52. RESULTADOS DEL PROCESO DE VALIDACIÓN A PARTIR DE MUESTRA DE CAMPO. ....	199
TABLA 53. ELABORACIÓN DE UN UMBRAL DE CONFIANZA PARA LA CIFRA DE CEREAL EN RIEGO .....	200
TABLA 54. RESULTADOS DEL PROCESO DE VALIDACIÓN A PARTIR DE MUESTRA DE PARCELAS SITUADAS EN EXPLOTACIONES CON LECTURA DE CAUDALÍMETRO.....	201



TABLA 55. AGRUPACIÓN SEGÚN EL HISTORIAL DE RIEGO DE CADA PARCELA DE CEREAL EN LA UH 04.04 .....	202
TABLA 56. SUPERFICIE CLASIFICADA MEDIANTE TELEDETECCIÓN VISITADA DURANTE LA CAMPAÑA DE VALIDACIÓN. ....	203
TABLA 57. MATRIZ DE CONFUSIÓN DEL MAPA DE CULTIVOS HERBÁCEOS EN REGADÍO. ....	204
TABLA 58. SUPERFICIE MUESTREADA DE LOS PRINCIPALES CULTIVOS EN LA ZONA DE ESTUDIO. ....	206
TABLA 59. FIABILIDAD POR CULTIVO DEL MAPA DE HERBÁCEOS REGADOS EN 2009 .....	207
TABLA 60. PORCENTAJE ESTIMADO DE RIEGO DE VIÑA EN LAS ZONAS DE MUESTREO PARA VALIDACIÓN..	208
TABLA 61. PORCENTAJE DE ACIERTO EN LA IDENTIFICACIÓN DE RIEGO O SECANO EN EL VIÑEDO.....	212
TABLA 62. PORCENTAJE DE ACIERTO EN LA IDENTIFICACIÓN DE RIEGO PARA LA VIÑA, POR ZONA .....	214
TABLA 63. DISTRIBUCIÓN DE PARCELAS ANALIZADAS CON ERRORES EN EL PROCESO DE ASIGNACIÓN. ....	215
TABLA 64. PROBABILIDAD DE RIEGO EN LAS PARCELAS DE VALIDACIÓN, SEGÚN EL MODELO. ....	222
TABLA 65. PROBABILIDAD DE RIEGO SEGÚN EL MODELO EN LAS PARCELAS DE VALIDACIÓN .....	223
TABLA 66. COMPARACIÓN ENTRE LOS DATOS DE CAMPO Y LOS OBTENIDOS MEDIANTE FOTOINTERPRETACIÓN. ....	226
TABLA 67. CARACTERÍSTICAS DE LAS MUESTRAS DE CAMPO USADAS EN EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD...	228
TABLA 68. PORCENTAJE DE ACIERTO EN LA IDENTIFICACIÓN DE RIEGO PARA MAPAS ELABORADOS A PARTIR DE DIFERENTES MUESTRAS DE CAMPO.....	228
TABLA 69. CUANTIFICACIÓN DE SUPERFICIE REGADA EN LOS ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS EN 2009 .	239
TABLA 70. RESUMEN DE LA VALIDACIÓN DEL MAPA DE HERBÁCEOS REGADOS EN PRIMAVERA.....	242
TABLA 71. ESTIMACIÓN DE SUPERFICIES REGADAS DURANTE LA PRIMAVERA EN EL PERIODO 2004- 2009 .....	244
TABLA 72. PRECIPITACIÓN ANUAL DURANTE LOS MESES ENTRE MARZO Y MAYO PARA EL PERIODO 2004 - 2009.....	245
TABLA 73. ESTIMACIÓN DE SUPERFICIES REGADAS DE HERBÁCEOS DE VERANO ENTRE 2004 Y 2009.....	247
TABLA 74. ESTIMACIÓN DE SUPERFICIES REGADAS (HA) DE CULTIVOS LEÑOSOS ENTRE 2004 Y 2009 ....	247
TABLA 75. DISTRIBUCIÓN POR TIPO DE CULTIVO DE LA SUPERFICIE EN REGADÍO ENTRE 2004 Y 2009 ....	248
TABLA 76. COMPARACIÓN DE DATOS DE SUPERFICIE REGADA ENTRE ESYRCE PARA LA PROVINCIA DE CIUDAD REAL Y EL MAPA SOBRE LOS ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS. ....	250
TABLA 77. COMPARACIÓN DE DATOS DE SUPERFICIE REGADA ENTRE DECLARACIONES PAC Y EL MAPA SOBRE LOS ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS. ....	251

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CONCEPTOS RELACIONADOS CON LA DEFINICIÓN DE REGADÍO. ....	9
FIGURA 2. EJEMPLOS DE MAPAS TEXTURALES. ....	24
FIGURA 4. SEGMENTACIÓN TERRITORIAL PARA LA TOMA DE MUESTRAS DURANTE LA PRIMAVERA .....	50
FIGURA 5. SEGMENTACIÓN TERRITORIAL REALIZADA TRAS LA CAMPAÑA DE CAMPO DE VIÑEDO DE 2008...	54
FIGURA 6. LOCALIZACIÓN DE LA POSICIÓN DEL EQUIPO DE CAMPO SOBRE UNA COMPOSICIÓN EN COLOR INFRARROJO. ....	56
FIGURA 7. DISTRIBUCIÓN DE LA MUESTRA TOMADA DURANTE LA CAMPAÑA DE PRIMAVERA DE 2009.....	59
FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN DE PARCELAS MUESTREADAS DURANTE LA CAMPAÑA PARA HERBÁCEOS DE VERANO. EN COLOR NARANJA, SE REPRESENTA LA MUESTRA RECOGIDA EN VERANO Y EN COLOR VERDE, LA RECOGIDA EN LA CAMPAÑA DE OTOÑO.....	62
FIGURA 9. PARCELAS DE VIÑEDO MUESTREADAS EN EL ÁMBITO DE ESTUDIO DURANTE LA CAMPAÑA DE 2008.....	64
FIGURA 10. PARCELAS DE VIÑEDO MUESTREADAS EN LA CAMPAÑA DE 2009, EN EL ÁMBITO DE ESTUDIO.. ....	66
FIGURA 11. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO EN EL SISTEMA DE REFERENCIA LANDSAT. ....	69
FIGURA 12. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO EN EL SISTEMA DE REFERENCIA SPOT.....	71
FIGURA 13 LOCALIZACIÓN DE LAS ZONAS VOLADAS CON LA CÁMARA MULTIESPECTRAL ADS40. ....	73
FIGURA 14. EJEMPLO DE IMAGEN MULTIESPECTRAL A 25 CM SOBRE PARCELAS DE VIÑEDO.. ....	75
FIGURA 15. COMPOSICIÓN EN COLOR INFRARROJO A PARTIR DE UNA IMAGEN LANDSAT Y FOTOGRAFÍA DE DIFERENTES TIPOS DE CUBIERTAS: HERBÁCEO REGADO, CEREAL COSECHADO, VEGETACIÓN EN BARBECHO Y BOSQUE. ....	86
FIGURA 16. IDENTIFICACIÓN DE PARCELAS CULTIVADAS DE ALFALFA.....	87
FIGURA 17. IDENTIFICACIÓN DE PARCELAS CULTIVADAS DE CEBOLLA.....	88
FIGURA 18. IDENTIFICACIÓN DE PARCELAS CULTIVADAS DE GIRASOL .....	89
FIGURA 19. IDENTIFICACIÓN DE PARCELAS CULTIVADAS DE MAÍZ.....	90
FIGURA 20. IDENTIFICACIÓN DE PARCELAS CULTIVADAS DE MELÓN Y SANDÍA .....	92
FIGURA 21. IDENTIFICACIÓN DE PARCELAS CULTIVADAS DE PATATA.....	92
FIGURA 22. IDENTIFICACIÓN DE PARCELAS CULTIVADAS DE PIMIENTO O TOMATE.....	93
FIGURA 23. IDENTIFICACIÓN DE PARCELAS CULTIVADAS DE REMOLACHA .....	94
FIGURA 24. EJEMPLOS DE DIFERENTES TIPOLOGÍAS DE CULTIVO DE GIRASOL OBSERVADAS DENTRO DE LA LLANURA MANCHEGA. ....	96
FIGURA 25. DIFERENCIAS ENTRE COMPOSICIONES EN COLOR NATURAL (IZQUIERDA) Y EN COLOR INFRARROJO (DERECHA).....	98
FIGURA 26. MÁSCARA DE ZONAS NO AGRÍCOLAS. ....	99
FIGURA 27. EJEMPLO DE VISUALIZACIÓN DEL MAPA DE SUPERFICIE DE HERBÁCEOS REGADOS DURANTE EL VERANO. ....	102
FIGURA 28. DISCRIMINACIÓN VISUAL DE PLÁSTICOS EN CULTIVOS DE MELÓN. ....	105
FIGURA 29. ZONIFICACIÓN PARA LA CLASIFICACIÓN DE CULTIVOS HERBÁCEOS EN REGADÍO EN EL VERANO DE 2009. ....	110
FIGURA 30. FUNCIONAMIENTO DEL CLASIFICADOR DE MÁXIMA PROBABILIDAD .....	111

FIGURA 31. PROCESO DE OBTENCIÓN DEL MAPA DE SUPERFICIE CULTIVADA EN PRIMAVERA DE 2009. ....	122
FIGURA 33. EVOLUCIÓN VISUAL DE LA RESPUESTA ESPECTRAL DE PARCELAS DE AJO.....	124
FIGURA 34. EJEMPLO DE EVOLUCIÓN FENOLÓGICA DE LEGUMINOSAS OBSERVADAS EN CAMPO .....	125
FIGURA 35. SEGMENTACIÓN DEL TERRITORIO PARA LA DISCRIMINACIÓN DE RIEGO EN CEREAL. ....	128
FIGURA 36. EJEMPLOS DE ROTACIONES DE CULTIVOS CON PREDOMINIO DEL SECANO. ....	133
FIGURA 37. EJEMPLO DE ZONA INTERMEDIA CON ROTACIONES DE CULTIVO VARIADAS. ....	134
FIGURA 38. EJEMPLO DE ROTACIONES INTENSIVAS DE RIEGO. ....	135
FIGURA 39. COMPARACIÓN ENTRE PESO DE ESPIGAS DE CEBADA Y VALORES DE ÍNDICES DE TELEDETECCIÓN .....	140
FIGURA 40. MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE CEREAL EN SECANO Y REGADÍO EN 2009 .....	142
FIGURA 41 EJEMPLO GRÁFICO DEL MAPA DE CEREAL EN REGADÍO (ESCALA 1:5.000). ....	142
FIGURA 42. IDENTIFICACIÓN DE CULTIVOS LEÑOSOS SOBRE ORTOFOTO DIGITAL. ....	147
FIGURA 43 PARCELAS DE VIÑEDO ARRANCADAS EN 2009 (EN COLOR AZUL) Y LOCALIZADAS POR HABER SIDO CULTIVADAS CON HERBÁCEOS DURANTE LA PRIMAVERA DE 2009. ....	148
FIGURA 44. DETECCIÓN DE ARRANQUES DE VIÑEDO. ....	149
FIGURA 45. INCLUSIÓN DE PARCELAS EN EL MAPA DE 2009 EN BASE A SU RESPUESTA EN LAS IMÁGENES DE VERANO.....	150
FIGURA 46. DISTRIBUCIÓN DEL VIÑEDO DENTRO DE LOS ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA. ....	150
FIGURA 47. ZONIFICACIÓN PARA LA ESTIMACIÓN DEL VIÑEDO EN REGADÍO EN 2009. ....	151
FIGURA 48. EJEMPLO DE MAPA DE PROBABILIDAD DE EXISTENCIA DE RIEGO ELABORADO A PARTIR DEL PROCESO DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO .....	171
FIGURA 49. EJEMPLO DE CONSTRUCCIÓN DE CURVA DE ROC .....	176
FIGURA 50. SEPARABILIDAD ENTRE VIÑA EN SECANO Y VIÑA EN REGADÍO.....	178
FIGURA 51. EJEMPLO SOBRE UNA MISMA ZONA DEL TERRITORIO DE LA CARTOGRAFÍA INICIAL DE PARCELAS DE VIÑEDO Y DEL MAPA FINAL OBTENIDO TRAS EL PROCESO DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO. ....	180
FIGURA 52. DISTRIBUCIÓN DEL PORCENTAJE DE RIEGO EN EL VIÑEDO DENTRO DEL ÁREA DE ESTUDIO. ..	194
FIGURA 53. DISTRIBUCIÓN DEL VIÑEDO EN REGADÍO DENTRO DE LA ZONA DE ESTUDIO. ....	195
FIGURA 54. EJEMPLOS DE CARACTERIZACIÓN DEL VIÑEDO EN EL MUESTREO DE CAMPO. ....	209
FIGURA 55. EFECTO DE LA EDAD DEL CULTIVO SOBRE LA FRACCIÓN DE CUBIERTA VEGETAL SOBRE EL TERRENO.....	210
FIGURA 56. TIPOLOGÍA DE LOS ERRORES EN EL MAPA DE VIÑA EN REGADÍO: VIÑA EN VASO JOVEN EN RIEGO. ....	216
FIGURA 57. TIPOLOGÍA DE LOS ERRORES EN EL MAPA DE VIÑA EN REGADÍO: VIÑA EN ESPALDERA JOVEN EN RIEGO. ....	217
FIGURA 58. TIPOLOGÍA DE LOS ERRORES EN EL MAPA DE VIÑA EN REGADÍO: EFECTO DE BORDE.....	218
FIGURA 59. TIPOLOGÍA DE LOS ERRORES EN EL MAPA DE VIÑA EN REGADÍO: SUELO CON RESPUESTA FUERTE .....	219
FIGURA 60. RELACIÓN TEÓRICA ENTRE VALORES MULTICRITERIO Y LA ESCALA DE PROBABILIDAD PROPUESTA. . ....	221
FIGURA 61. EJEMPLOS DE ERRORES EN EL INTERVALO DE MUY BAJA PROBABILIDAD DE RIEGO .....	222

FIGURA 62. EJEMPLO DE VIÑA CON RIEGO DE APOYO CON PROBABILIDAD DE RIEGO SITUADA EN LA ZONA DE ENTORNO DEL UMBRAL DE DECISIÓN DE ASIGNACIÓN DE LA CATEGORÍA DE RIEGO ....	224
FIGURA 63. EJEMPLO DE PARCELA INCORRECTAMENTE IDENTIFICADA EN CAMPO. ....	226
FIGURA 64. COMPARACIÓN DEL MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LAS EXTRACCIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA RIEGO (IMAGEN SUPERIOR) CON EL MAPA ESTIMADO DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS (IMAGEN INFERIOR) .....	254

## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1. Contexto general

La aprobación de la Directiva Marco del Agua por parte de la Comisión Europea en el año 2000, impone la necesidad de conseguir un estado de buena calidad del agua, tanto a nivel cualitativo como cuantitativo, considerando este recurso como un bien escaso y necesario para la sociedad. Su principal objetivo es llegar a una gestión sostenible de los recursos hídricos que incluya la adecuada conservación de los ecosistemas, hábitats y especies ligados al agua.

En el ámbito mediterráneo, las políticas hidrológicas y ambientales se encuentran ligadas de forma muy directa con las políticas agrícolas, ya que este sector se convierte en el principal consumidor de los recursos hídricos disponibles. La agricultura no solo se trata de un sector productivo que aun mantiene una gran importancia económica en muchas zonas rurales; además, aporta bienes ambientales como la diversidad paisajística o el mantenimiento de hábitats, y bienes públicos de carácter social como la fijación de la población al territorio o la seguridad alimentaria.

Sin embargo, la presión agrícola sobre el territorio dificulta el cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad de la Directiva Marco, debido a un aumento de la contaminación difusa, a la competencia directa con usos ambientales y sociales, y al impacto directo sobre la propia conservación del recurso. Los aspectos cuantitativos resultan especialmente importantes en el caso de nuestro país, debido al desarrollo e importancia del regadío en una situación climática donde la disponibilidad hídrica resulta reducida y los periodos de sequía se repiten con una elevada periodicidad.

La disponibilidad limitada de recursos produce conflictos en relación a los usos del agua, que pueden llegar a producir afecciones graves sobre humedales, cursos de agua y masas de agua subterránea. Por este motivo, se asume la necesidad de una integración apropiada de las políticas agrarias e hídricas para poder cubrir los objetivos ambientales y sociales ligados al agua. En el momento actual, se está implantando el concepto de condicionalidad en el cobro de ayudas ligadas a la PAC (Política Agraria Común), basado en la definición de una serie de requisitos que deben cumplirse por parte de los agricultores para poder recibir subvenciones de la Unión Europea. Estos requisitos se definen por un conjunto de “buenas condiciones agrícolas y ambientales” (GAEC, *Good Agricultural and Environmental Conditions*) dirigidas al mantenimiento de las condiciones edáficas, la disminución de la contaminación por nitratos, fósforo y pesticidas, y a la conservación de niveles adecuados para la protección y gestión del agua.

Tanto para el seguimiento del cumplimiento de la política agraria como para el desarrollo de los programas de medidas contemplados en los planes hidrológicos a nivel de cuenca

hidrográfica, es necesario realizar procesos de control, que pueden tener un carácter obligatorio o recomendado. En el caso de las extracciones de aguas subterráneas, se obliga a la existencia de un registro de extracciones autorizadas, revisado periódicamente y actualizado o completado con información auxiliar cuando sea conveniente.

En aquellas zonas donde el riego se produce a partir de la extracción de aguas subterráneas desde pozos con concesión o derecho de uso privativo del agua, la disponibilidad de cartografía precisa y actualizada de la distribución de cultivos regados resulta una herramienta de control clave para una correcta gestión de los recursos (Dworak et al, 2010).

Esta información resulta un elemento básico para la adecuada elaboración de políticas y medidas de gestión. A pesar de este hecho, muchos de los datos disponibles, obtenidos a partir de diferentes fuentes y métodos, resultan heterogéneos y poco coincidentes. La evolución que han seguido las técnicas de proceso digital de datos de Observación de la Tierra y de análisis espacial, junto a la mayor disponibilidad de datos geográficos, justifica la elección de un enfoque basado en el uso de tecnologías de Información Geográfica para abordar la necesidad de contar con información fiable.

En este contexto, la principal contribución de esta investigación se enfoca al diseño, desarrollo y validación de una metodología encaminada a la determinación de superficies regadas y a la estimación de la demanda hídrica para riego dentro de un territorio, usando como base datos y técnicas de análisis geográfico.

Esta Tesis Doctoral se engloba dentro del amplio conjunto de estudios e investigaciones realizadas en torno al problema hídrico y ambiental generado durante las últimas décadas en la Cuenca Alta del Guadiana (ver apéndice A.2.3), y que se ha convertido en un caso paradigmático y de referencia en el ámbito europeo.

## **1.2. Selección del ámbito de estudio**

La selección de la Cuenca Alta del Guadiana como zona de trabajo<sup>1</sup> donde diseñar y desarrollar una metodología para la extracción de información sobre la distribución y tipología de los cultivos regados, se justifica por varios motivos:

- desde un punto de vista de aplicabilidad de los resultados: por la importancia de la problemática creada en torno a la sobreexplotación de sus recursos hídricos y la pérdida y degradación de ecosistemas de alto valor ambiental.
- desde un punto de vista de investigación: por la variabilidad de los cultivos y de las situaciones de riego existentes, y por la dificultad de discriminar la presencia de riego en un cultivo como la viña, de baja cubierta foliar.

---

<sup>1</sup> La delimitación geográfica de la Cuenca Alta del Guadiana se define en el Apéndice A.1.1.

Así, la Cuenca Alta del Guadiana es una zona donde se identifica una necesidad directa de conocer la demanda hídrica de la agricultura, y donde tanto las técnicas tradicionales como las técnicas centradas en el proceso de información geográfica se enfrentan con notables dificultades para la determinación de las superficies ocupadas por los cultivos en regadío de mayor extensión.

Además, esta elección ha venido condicionada por mi propia trayectoria académica y profesional, que ha estado muy ligada a este territorio<sup>2</sup>. El trabajo desarrollado en la presente Tesis va más allá del propio marco temporal de esta investigación, y es el resultado de la integración de dos líneas de trabajo: una desarrollada a lo largo de casi 10 años en el ámbito de la empresa y en el contexto de la teledetección operativa, y la otra, de carácter más académico y centrada en la investigación sobre la integración de datos geográficos para la evaluación de alternativas y la toma de decisiones.

Por último, quiero destacar la estrecha colaboración por parte de la Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHG). La Comisaría de Aguas de este Organismo ha puesto a disposición de esta investigación una gran cantidad de datos geográficos y administrativos, ha cedido su colección de imágenes de satélite y ha autorizado el uso de material obtenido en varios de sus estudios.

---

<sup>2</sup> Durante el año académico 2000-01, desarrollé mi proyecto de fin de carrera sobre el tema de la evolución de cultivos herbáceos de alta dotación regados en los acuíferos de la Mancha Occidental y del Campo de Montiel a partir de técnicas de teledetección. Mis tutores fueron la Dra. Virginia Rubio y el Dr. Salomón Montesinos (codirector de la presente Tesis), quien ya elaboró una década antes el primer estudio publicado en España sobre cuantificación de superficies regadas a partir del proceso digital de imágenes de satélite, y que también se llevó a cabo en la región manchega,

Desde entonces, he participado en numerosos estudios ligados a la aplicación de técnicas de teledetección para la discriminación de cultivos regados y análisis de extracciones, especialmente dentro la Cuenca Alta del Guadiana. En este territorio, he trabajado en varios proyectos promovidos por la Confederación Hidrográfica del Guadiana para el control del cumplimiento de los regímenes de explotación de los acuíferos y el desarrollo de un sistema de alerta rápida para la detección de infractores y también he participado como investigador en el proyecto *HAGAR* del programa LIFE de la Comisión Europea, cuyo objetivo se centró en el desarrollo de herramientas y prácticas que favoreciesen el ahorro de agua en La Mancha Occidental.

En estos años, he tenido la oportunidad de poder conversar y discutir diversos aspectos relacionados con la gestión hídrica con personas ligadas muy directamente a la gestión de los recursos hídricos y pertenecientes a ámbitos contrapuestos, desde personal de la Administración hídrica, hasta representantes de las Comunidades de Regantes o técnicos de organizaciones ambientalistas y conservacionistas. Esta perspectiva, junto al conocimiento adquirido en los trabajos de campo y en los análisis de imágenes llevados a cabo durante varios años, forma parte, de manera directa o indirecta, de esta Tesis.

Durante el año académico 2006-07, después de acabar los cursos de doctorado, llevé a cabo mi trabajo para la obtención del DEA bajo la supervisión del Dr. José Antonio Rodríguez Esteban, también codirector de la Tesis, y en un aspecto muy diferente. El tema del estudio fue el modelado prospectivo de cambios en el territorio a partir de métodos de evaluación multicriterio y multiobjetivo. Este trabajo me permitió profundizar en el empleo de las técnicas de análisis espacial e integración de datos, aplicadas en esta Tesis.

### 1.3. Estructura y conceptualización de la investigación

La estructura de la memoria descriptiva de la investigación se divide en seis capítulos a los que se une un amplio apéndice. El cuerpo del texto se centra en la aproximación metodológica, mientras que en el apéndice se trata la caracterización del ámbito de estudio, abordando aspectos geográficos, hídricos, ambientales, socioeconómicos y relativos a la gestión territorial. A lo largo del texto se indican diversas referencias a apartados del apéndice con objeto de permitir una mejor comprensión del desarrollo metodológico propuesto.

La razón de esta separación se justifica en la distinta naturaleza de ambas partes. El desarrollo metodológico resulta el núcleo y aportación fundamental de la investigación, y es donde se abordan los objetivos principales de la Tesis. Los capítulos de la descripción metodológica se separan en:

- i) introducción, donde se exponen las hipótesis de partida y los objetivos de la investigación
- ii) análisis del estado del conocimiento, dirigido a mostrar el *estado del arte* existente en la aplicación de técnicas de información geográfica en agricultura, haciendo énfasis en los aspectos relacionados con la discriminación de superficies regadas
- iii) diseño general de la metodología, y descripción general de la adquisición y recopilación de datos geográficos
- iv) desarrollo metodológico para la obtención de la distribución de cultivos regados a lo largo de una campaña agrícola
- v) exposición y validación de resultados
- vi) conclusiones relacionadas con diversos aspectos de la investigación

La aproximación metodológica que se plantea, a pesar de que se basa en conceptos y técnicas que permitirían su adaptación a otros ámbitos de trabajo, ha sido diseñada y ajustada teniendo en cuenta tanto las características territoriales como la cultura agrícola propia de la zona de estudio.

Dentro de este marco, se ha elaborado un apéndice descriptivo de las principales características del medio físico y socioeconómico donde, además, se ha incidido tanto en la relación existente entre agua, hombre y territorio, como en la evolución de las políticas hídricas aplicadas en la zona a lo largo de los últimos cincuenta años.

La caracterización del marco de estudio sirve como apoyo a la mejor comprensión del enfoque metodológico, de la evaluación de los resultados y de la descripción de las aplicaciones prácticas del trabajo efectuado.



La inclusión del apéndice, aparte de su propio valor como recopilación del conocimiento existente, resulta fiel a un concepto que se mantiene inherente a lo largo de la investigación realizada, en la que se defiende que el diseño y ajuste de la metodología en función de las características territoriales redundan en una mejora apreciable de los resultados que pueden obtenerse.

Las tecnologías de Información Geográfica son aceptadas como una herramienta muy potente para la extracción o generación de información, debido a su elevada capacidad de análisis. Sin embargo, esta capacidad puede llegar a convertirse en un defecto cuando este tipo de técnicas se instauran y defienden en razón de su propia potencia, pero no son aplicadas sobre unas bases adecuadas o los resultados obtenidos no son evaluados de forma rigurosa.

Los estudios basados en tecnologías de Información Geográfica corren el riesgo de presentar serias carencias cuando son elaborados al margen de factores clave como los requisitos de los gestores o usuarios, el conocimiento de los problemas a abordar y la consideración de características y elementos representativos del medio. La disponibilidad de algoritmos complejos y de sistemas con gran capacidad de cálculo permite la obtención, gracias a la aplicación de metodologías genéricas, de un elevado volumen de información sobre el total del territorio estudiado en un tiempo reducido. Esta facilidad puede originar un cierto desprecio acerca de la conveniencia del conocimiento previo del ámbito de trabajo y de la necesidad de la validación de los resultados, con el riesgo de que éstos sean aceptados solo por haber sido extraídos a través de estas técnicas.

En contraposición a una visión, en donde la herramienta prima sobre el análisis, la metodología propuesta se enmarca en una concepción diferente; incidiendo en que el ajuste de las metodologías a partir de las características territoriales permite un mejor aprovechamiento del potencial de las herramientas de proceso digital de datos geográficos. El planteamiento general de este enfoque defiende que los puntos clave para la obtención de información sobre la distribución de usos del suelo en un territorio son: la experiencia y conocimiento de la zona del equipo de trabajo y su capacidad para integrar datos provenientes de distintas fuentes (Gallego, 1999).

Además, dentro del proceso, se ha tenido presente en todo momento un enfoque operativo, centrado en potenciar la utilidad práctica de la investigación. Este hecho ha implicado que la selección de los datos de partida se haya adaptado a las posibilidades existentes para cubrir la totalidad del territorio y a las necesidades, en cuanto a calidad de la información, de gestores u otros usuarios involucrados.

A pesar de la apuesta por una aproximación metodológica ligada al componente territorial y ajustada a la Cuenca Alta del Guadiana, la metodología propuesta para la delimitación de superficies regadas no pierde su carácter general, pudiéndose aplicar a otro territorio diferente siempre que se consideren e integren los criterios adecuados y se disponga de los datos necesarios.

## 1.4. Objetivos

El objetivo principal de esta Tesis es la elaboración de un desarrollo metodológico orientado a la determinación de la distribución de superficies de cultivos en regadío dentro de un territorio, y que ha sido aplicado, en un contexto operativo, en el ámbito de los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana.

El cumplimiento de este objetivo presenta numerosos retos, en torno a los cuales se centra el carácter de innovación de la investigación. Entre ellos destacan la discriminación de la presencia de riego en las explotaciones de viñedo, la detección de riegos de apoyo en cultivos de cereal y la distinción precisa entre especies de herbáceos de alta dotación regadas durante el verano.

Hasta el momento, las metodologías empleadas con este fin hacen énfasis en el empleo de la teledetección como herramienta para la extracción de información temática a partir del proceso digital de imágenes de satélite. Los métodos aplicados, basados en la clasificación multitemporal y multispectral de imágenes, proporcionan una primera aproximación a la cuantificación de superficies regadas, aceptable para algunas aplicaciones pero poco precisa para otras utilidades, sobre todo en el caso de cultivos muy representativos en la Mancha como son el viñedo o el cereal.

La metodología propone una mayor integración de los datos de teledetección con otros tipos de datos auxiliares obtenidos de fuentes diversas y cuyo uso no resulta convencional en este tipo de procesos. Para ello, se sirve de técnicas de evaluación multicriterio y de operaciones de análisis espacial ajustadas a partir de árboles de decisión. Esta aproximación integrada es la principal aportación de esta investigación para la consecución del objetivo propuesto.

El carácter operativo que alienta esta investigación impone la necesidad de realizar un proceso de validación riguroso y detallado de los resultados, sometiendo los datos a contraste con muestra de campo y con los resultados obtenidos a partir de otras aproximaciones. La determinación de la fiabilidad y precisión de los resultados obtenidos y la elaboración de intervalos asociados a las cifras de superficie regada y demanda hídrica para riego constituyen un objetivo secundario del estudio.

Además, otros objetivos complementarios son la mejora del conocimiento territorial (a partir de la elaboración de un mapa completo de distribución de superficies regadas) y el ensayo de un proceso metodológico novedoso que pueda ser desarrollado y aplicado dentro de otras zonas y para otras tipologías de cultivos.

## 2. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL CONOCIMIENTO

### 2.1. Introducción: conceptos sobre la cuantificación de superficies regadas

La superficie regada en España ha experimentado un crecimiento rápido y muy extendido durante las últimas décadas, ligado a una transformación generalizada desde una agricultura tradicional hacia un escenario de mayor intensificación, tecnificación y modernización de los sistemas de riego. Se considera que la superficie regable en España supera los tres millones de hectáreas, con un consumo estimado de más de 24.000 hm<sup>3</sup> anuales, más de un 80% del total nacional, según datos del INE.

Dentro del volumen total consumido se estima que las extracciones de aguas del subsuelo se sitúan en torno a los 6.500 hm<sup>3</sup> (Sahuquillo *et al*, 2009), representando más del 20% del total de agua usada en España, aunque hay que tener en cuenta que casi la totalidad del agua empleada en las islas y en algunas zonas peninsulares tiene un origen subterráneo. Su uso para abastecimiento permite satisfacer las necesidades de cerca de una cuarta parte de la población del país, aunque el sector agrícola es el mayor consumidor del recurso, principalmente como consecuencia de la iniciativa privada de una gran cantidad de agricultores a título individual u organizados en pequeñas cooperativas o sociedades. Este hecho dificulta enormemente el control del volumen de extracciones y la planificación de las demandas hídricas en distintos horizontes temporales.

La carencia, debido a su coste y tiempo de elaboración, de estadísticas de detalle sistemáticas y fiables sobre usos y demandas de agua condiciona el conocimiento del aprovechamiento actual y futuro del agua. La incertidumbre en los datos básicos relacionados con el uso del agua en agricultura unida a la influencia de numerosos factores exógenos en la constitución de las demandas, hace que la previsión de las demandas futuras presente una especial dificultad, siendo frecuente encontrar desviaciones significativas entre las demandas inicialmente previstas y las finalmente resultantes (Erena, 2006).

La estimación de la evolución de la demanda de agua en el tiempo es uno de los aspectos que produce mayores desviaciones y errores en el proceso habitual de restitución del régimen natural de las series de aportaciones. El estudio de la evolución de la demanda agraria es uno de los aspectos más significativos, debido no solo al peso específico que representa dentro de la demanda global de una cuenca, sino también a la dificultad que presenta su estimación por técnicas convencionales. La falta de cumplimiento de la planificación hídrica suele implicar consecuencias negativas de tipo

ambiental, legal y social; siendo la Cuenca Alta del Guadiana una de las zonas del país donde este hecho se ha hecho patente con mayor intensidad (ver Apéndice A.2).

Habiendo reconocido la importancia de esta información, en los últimos años se han abordado diversos tipos de estudios y proyectos, desde diferentes enfoques, para la estimación de superficies regadas en zonas de interés. Dentro de estos trabajos que abarcan estadísticas agrarias, mapas de cultivos elaborados mediante metodologías diversas y cartografía de usos del suelo, resulta habitual que términos como, -regadío, área regada o superficie en regadío-, se usen indistintamente, a pesar de que tienen significados muy diferentes (Montesinos y Bea, 2008).

El término “regadío” se define como un terreno fertilizado para el riego. Sin embargo, cuando se alude al regadío como un uso de suelo, se hace referencia a una clase de uso que se representa gráficamente como una envolvente o polígono (en la jerga SIG), donde la clase dominante son cultivos de regadío, pero donde pueden existir otras clases que por su poca abundancia o pequeño tamaño (depende de la escala de trabajo), no son representadas. Por tanto, los resultados relativos al regadío obtenidos por este tipo de estudios, deben matizarse si se tiene en cuenta la diferente densidad de los perímetros clasificados como regadío en cada uno de los años considerados (Pozo de Castro, 1999).

El “área regada” correspondería a los terrenos que se están regando en un momento determinado. Así, el área regada en un territorio durante la primavera es distinta al área regada durante el verano, ya que encontramos cultivos diferentes con variaciones significativas de ciclo fenológico y culturas agrícolas.

El concepto “superficie en regadío” corresponde a los terrenos realmente regados en un periodo de tiempo. Desde un punto de vista matemático, se define como el sumatorio espacial de áreas regadas. Así, si caracterizamos una zona y podemos identificar los cultivos a lo largo de un año, la unión de todas las parcelas que aparecen cultivadas nos da la superficie en regadío para ese periodo (en este caso, un año). Lógicamente, el periodo de tiempo tratado en un análisis de superficie en regadío no siempre es anual, siendo necesario especificarlo cada vez que se proporciona un dato de este tipo.

Por último, la “superficie regable” se corresponde con toda aquella superficie que tiene potencialidad para ser regada.

A la hora de realizar cuantificaciones, estos conceptos no deben ser confundidos. Las áreas regadas se refieren a momentos concretos, y no dejan de ser una parte de la superficie en regadío en un determinado periodo, generalmente un año natural o un año hidrológico. Cuando la superficie en regadío se calcula para el conjunto de una serie temporal amplia de años consecutivos, el resultado tiende a acercarse a la superficie regable, que representa el conjunto de parcelas dotadas de infraestructura de riego y que determinan la demanda potencial máxima de un territorio. Por otro lado, la clase regadío

resulta una aproximación al uso del suelo predominante en una zona, y supone, en muchas ocasiones, un incremento muy importante sobre la situación real.

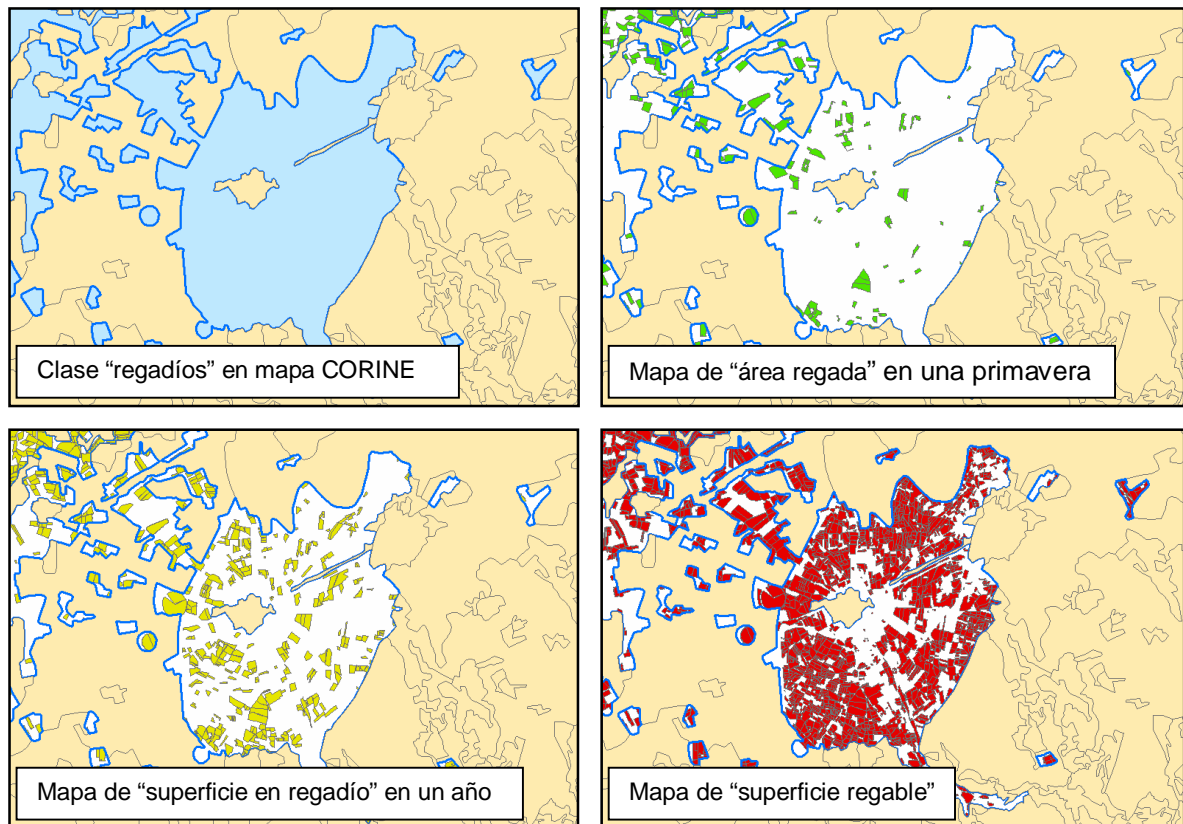


Figura 1. En la imagen superior izquierda, se representa el mapa de usos del suelo del proyecto CORINE LAND COVER, resaltando en color azul la clase cultivos regados de forma permanente. En la imagen superior derecha se muestra el mapa de área regada calculado para una primavera, que cubre una parte muy reducida del total de la clase de regadío. En la imagen inferior izquierda, se muestra el mapa de superficie en regadío, para un año completo. Por último, la figura inferior derecha, recoge la superficie en regadío calculada para un periodo de cinco años consecutivos, y que tiende a aproximarse al total de superficie regable.

Los datos disponibles en la actualidad sobre superficies regadas o regables son obtenidos mediante metodologías muy variadas y deben ser interpretados teniendo en cuenta factores relativos a su origen, representatividad y finalidad.

- a) La fuente de datos más tradicional consiste en el uso del catastro de rústica para la identificación de las parcelas agrícolas anotadas como regadíos. La clasificación existente en el catastro entre regadíos y secanos no responde a criterios hidrológicos ni está sujeta a ningún tipo de control ni actualización, siendo su fin principal el reconocimiento del valor adicional que se otorga a los terrenos con accesibilidad al agua para riego. De esta forma, el valor contributivo y catastral de los terrenos en regadío resulta superior al de las tierras arables de secano.

La cifra proporcionada por catastro debería considerarse como una aproximación a la superficie regable existente. No obstante, el dato catastral no implica que las parcelas

declaradas como regadíos se encuentren realmente en riego, ni que parcelas catalogadas como secanos no puedan estar siendo regadas, ya que la decisión acerca de si una parcela se encuentra declarada como regadío o secano depende principalmente del propietario, por lo que muchos datos no se encuentran actualizados o simplemente no se corresponden con la realidad.

El catastro actual de rústica no es una fuente de datos fiable para establecer la demanda hídrica de una cuenca. La cifra numérica, así como la distribución geográfica que nos ofrece no hace referencia ni a lo real ni a lo potencialmente en regadío, sino a lo que administrativamente ha sido declarado en algún momento como tal. Como ejemplo, (Montesinos *et al*, 2007) en un estudio de carácter interno realizado por la Confederación Hidrográfica del Segura en la unidad hidrogeológica de Mazarrón, se observó que de 10.000 ha declaradas en catastro como regadío, un 43% eran coincidentes con superficies en regadío durante el año estudiado, un 22% se correspondían con parcelas agrícolas donde en ese año no se observó riego y hasta un 35% se situaba en zonas donde se comprobó la existencia de usos del suelo no agrícolas. Además, cerca de 1.200 ha identificadas en regadío no aparecían etiquetadas como tal dentro del catastro de rústica.

- b) Otra fuente que se ha empleado ha sido los mapas de usos del suelo, generados para todo el país a diferentes escalas dentro del proyecto Corine Land Cover (1990 y 2000) y en el momento actual, en el marco del proyecto SIOSE (Sistema de Información de la Ocupación del Suelo en España). Estos mapas delimitan envoltentes donde predomina el regadío en relación a otros usos del suelo, pero no deben ser empleados para la planificación de la demanda hídrica, ya que recogen la clase “regadío” que sobreestima las cifras reales de superficie regable y superficie en regadío. Además, su realización es laboriosa y lenta, hasta el punto que los mapas regionales del SIOSE, elaborados a partir de imágenes de los años 2005 y 2006, están siendo entregados durante el año 2010.
- c) La necesidad de datos más precisos para la planificación y control de políticas agrarias e hídricas ha empujado a la utilización de las estadísticas agrarias como fuente de datos específicos y ajustados a periodos concretos. Las estadísticas agrarias son la base para la elaboración de censos agrarios en los que se recoge la superficie en regadío en una determinada zona, normalmente proporcionándose datos desglosados a nivel de municipio y tipo de cultivo. Estos censos recogen un dato que se sitúa a medio camino entre los conceptos de superficie en regadío anual y superficie regable.

Para intentar aproximar las cifras estimadas por las estadísticas al concepto de superficie regada en cada año, se suelen utilizar las denominadas “hojas 1T”, que recogen estimaciones de la superficie existente de cada tipo de cultivo. Este dato se basa en recopilaciones efectuadas por las Cámaras Agrarias locales y comarcales de

acuerdo a las declaraciones y formularios de solicitud de ayudas para la PAC (Política Agraria Común) de los agricultores de la zona.

La cifra proporcionada por las hojas 1T no deja de ser una aproximación que puede ser más o menos válida dependiendo de varios factores como el grado de implicación de las cámaras agrarias, la voluntad de cooperación de agricultores y el porcentaje de superficie de cultivos existentes que reciban algún tipo de subvención desde la Unión Europea. Por otro lado, desde un punto de vista práctico y operativo, los datos obtenidos a través de las hojas 1T presentan dos inconvenientes. En primer lugar, son datos cuya obtención resulta muy laboriosa, por lo que no suelen estar disponibles hasta mucho más tarde del periodo temporal que cubren. Además, no están sujetos a ningún tipo de representación espacial, lo que impide usos relacionados con el empleo de técnicas de análisis espacial, así como su desagregación en unidades menores o diferentes que la de término municipal, lo cual resulta problemático al trabajar sobre unidades hidrogeológicas o masas de aguas subterráneas.

- d) Con objeto de conseguir una mayor fiabilidad y dotar de representación espacial a las cifras obtenidas, en los últimos años se han generalizado los mapas de distribución de cultivos realizados a escala de detalle sobre la base cartográfica proporcionada por la representación de las parcelas catastrales. Una clasificación de este tipo de mapas puede realizarse dependiendo del origen de los datos empleados para la elaboración de los mapas.

En algunas zonas del territorio se han elaborado mapas de cultivos y aprovechamientos de detalle basados en trabajos intensivos de campo, en los que se recorren todas las parcelas catastrales existentes en una zona, anotando el tipo de cultivo existente en cada una de ellas y se toman datos de acuerdo a un modelo previamente definido. Estos mapas resultan, sin duda, la fuente de datos más fiables, si bien como cualquier dato están sujetos a error. Este tipo de mapas no se encuentran generalizados ya que su elaboración resulta un proceso costoso (tanto desde el punto de vista económico como de tiempo y esfuerzo necesario), debiendo ser sometidos a actualizaciones anuales si se quiere mantener la calidad de la información que se obtiene a partir de ellos.

Para cultivos de tipo permanente, fundamentalmente cultivos de porte arbustivo o arbóreo, se han elaborado varios sistemas de información a partir de fotointerpretación de fotografía aérea ortorrectificada, apoyados en trabajos de campo. El proyecto pionero en esta línea fue el denominado “SIG Oleícola”, en el que a partir de un vuelo realizado sobre la totalidad del país en el año 1997, se identificaron las parcelas ocupadas por olivares. Esta línea de trabajo se continuó con el “SIGPAC”, donde se realizó la fotointerpretación de los usos del suelo presentes en el territorio nacional empleando una leyenda temática centrada en los usos agrícolas. Más recientemente algunas comunidades autónomas han desarrollado Sistemas de Información

específicos para otros cultivos, como viña, frutales o cítricos, en los que se recogen una serie de datos de interés asociados a la localización de cada parcela. Este tipo de mapas se centra en determinados cultivos y requieren de la disponibilidad de ortofotografía actualizada y de detalle para su creación y modificación.

Por último, encontramos mapas de cultivos que han sido elaborados a partir de datos de tipo alfanumérico. Este caso se corresponde principalmente con registros o inventarios que se encuentran en continuo cambio y a los que se les ha asociado una componente espacial. Un ejemplo es el registro vitícola de Castilla La Mancha, en donde a partir de un inventario que recoge datos de parcelas de viña, empleado para la gestión de producción y de las ayudas por reestructuración o arranque, se ha elaborado un mapa que representa la distribución de las parcelas en el territorio. Este tipo de mapas presenta la ventaja de una mayor actualización, si bien, en muchas ocasiones la conexión entre datos alfanuméricos y espaciales no resulta posible o presenta errores, lo que limita su aplicabilidad. Por otro lado, los datos empleados para la gestión no siempre incluyen el total de las parcelas existentes.

En general, estos mapas de distribución de cultivos y aprovechamientos resultan de gran utilidad para determinadas tareas de gestión agrícola, pero presentan desventajas críticas para su empleo en la gestión hídrica. Los datos relacionados con la distribución anual de cultivos en regadío son parciales y no están directamente disponibles. Además, la actualización de los datos resulta lenta y complicada, lo cual queda mitigado, en parte, por el carácter permanente de algunos cultivos.

- e) Con ánimo de obtener datos actualizados para cada campaña anual de riego y disponibles con plazo de respuesta cortos, se emplean también procesos estadísticos basados en el muestreo de campo. La metodología más generalizada es la basada en los marcos de muestreo, en la que se localizan las superficies de los cultivos existentes dentro de marcos regulares distribuidos aleatoriamente en el conjunto de la zona de interés. La muestra debe ser representativa, desde un punto de vista estadístico, del total de superficie cultivada existente. La estimación de la superficie total se realiza a través de procesos de inferencia estadística basados en la expansión de la muestra, en muchos casos mediante un proceso de tipo directo.

Este método se complementa, en ocasiones, con el tratamiento de imágenes de satélite, que sirven para delimitar las superficies regadas y ajustar la expansión de la muestra: si bien la dificultad existente en la determinación de las superficies regadas produce a su vez un error, que puede llegar a ser muy considerable dependiendo de la tipología de los cultivos de la zona.

Los datos obtenidos a partir de las estadísticas basadas en marcos de muestreo proporcionan información relacionada con la cantidad de superficie en regadío existente, con la ventaja de que se encuentra disponible en fecha próxima a las campañas de riego. Como contrapartida, no se obtiene la distribución de los cultivos



sobre el territorio, sino únicamente una cifra estimada acerca de la superficie ocupada por cada uno. Esta cifra está sujeta a una incertidumbre inherente a la metodología estadística empleada y que habitualmente no se especifica. En este sentido, el intervalo de confianza asociado a cifras obtenidas a partir de este método puede ser amplio, lo cual produce variaciones significativas en los datos de una serie de años sucesivos.

- f) Por último, hay que considerar el empleo de la teledetección, que permite utilizar las imágenes de satélite para observar la evolución de los usos del suelo y analizar la distribución de superficies regadas. Las especiales características de la teledetección espacial (resolución espacial, temporal, espectral, angular y radiométrica) la convierten en una fuente de datos potente, dinámica y objetiva para la planificación y gestión del uso de los recursos hídricos (Montesinos y Bea, 2008).

En la actualidad, el uso de la teledetección es asequible en relación a otras fuentes de datos y permite estimar con precisión y rapidez la distribución de superficies regadas, ofreciendo un gran rendimiento en términos de eficiencia temporal y relación *“información obtenida / coste”*.

El presente trabajo de investigación se centra en el desarrollo de una metodología basada en el empleo de teledetección y técnicas de modelización espacial para la elaboración de mapas de cultivos en regadío con objeto de estimar la demanda hídrica de un territorio. Para ello, se ha elegido como área de aplicación, los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana.

En el siguiente apartado se lleva a cabo una revisión de los estudios y aplicaciones basados en el uso de imágenes de satélite y técnicas de información geográfica para la cuantificación de superficies regadas.

## **2.2. Uso de Técnicas de Información Geográfica para la cuantificación de superficies regadas.**

Las técnicas geoespaciales, y especialmente la teledetección, han abierto un importante abanico de posibilidades dentro del campo de la agricultura, principalmente en forma de aplicaciones, en muchos casos operativas, relacionadas bien con la gestión directa de los cultivos, bien con la obtención de datos agronómicos de interés.

Desde el lanzamiento del primero de los satélites Landsat (primer satélite específicamente orientado al estudio de los recursos ambientales de la Tierra) hasta el momento actual, el número de estudios, proyectos de investigación y ensayos realizados a partir de datos obtenidos con sensores remotos y relacionados con la agricultura, ha sido ingente y muy variado. En este campo, se han desarrollado numerosas aplicaciones

con la finalidad de aumentar el conocimiento de la distribución de superficies cultivadas, así como de estimar o mejorar la producción y calidad de los cultivos.

La justificación al esfuerzo realizado se basa en tres factores de especial relevancia: i) la disponibilidad de una nueva tecnología que permite obtener datos difíciles de medir a partir de fuentes tradicionales y que se relacionan de manera directa con variables y parámetros biofísicos propios de la vegetación, ii) la importancia creciente de la agricultura y su necesidad de intensificación para poder proporcionar los alimentos necesarios a una población mundial en fuerte crecimiento, y iii) la extensión de modelos de pensamiento que relacionan el medio ambiente con los procesos económicos; y que han introducido los criterios de sostenibilidad en la toma de decisiones, poniendo de manifiesto los problemas existentes en el modelo de agricultura convencional.

Las prácticas agrícolas representan un conjunto de conocimiento acumulado en relación a las técnicas y procedimientos que se han mostrado como óptimos para el crecimiento de cultivos, basándose en el objetivo de producir cuanto más sea posible con un mínimo coste. El rápido crecimiento demográfico está ocasionando multitud de problemas para el modelo de agricultura tradicional, que se ha convertido en un elemento altamente consumidor de recursos, de presión sobre hábitats naturales, fuente de contaminación y que necesita cantidades crecientes de energía.

En este contexto, las nuevas tecnologías (teledetección, sistemas de información geográfica, modelos de decisión, sensores en tiempo real, etc...) se están convirtiendo en herramientas básicas para gestores y agricultores, proporcionando datos e información objetiva para la descripción y conocimiento de los sistemas agrícolas y para la mejora y optimización de las prácticas en campo.

En el presente capítulo, se aborda el análisis del estado del conocimiento aplicado en aquellas tecnologías que van a emplearse dentro de la investigación: el uso de datos de Observación de la Tierra y el empleo de análisis espacial multivariable. En ambos casos, se pondrá especial énfasis en identificar los trabajos relacionados con la elaboración de mapas de superficie regada y en analizar aquellos desarrollados sobre el área de estudio: la Cuenca Alta del Guadiana (ver Apéndice).

### **2.2.1. Teledetección y agricultura**

El desarrollo de estudios y aplicaciones basadas en el empleo de datos de teledetección en el campo de la agricultura ha sido muy amplio en las últimas décadas, cobrando una importancia creciente (Thomasson, 2003).

Su origen se puede situar en el empleo de fotografías aéreas que permitían la realización de operaciones sencillas de fotointerpretación para la obtención de información de interés agrícola. El lanzamiento de los satélites multispectrales de alta resolución, iniciado con

la serie Landsat, supuso un importante paso que permitió la implantación del proceso digital de la imagen como una nueva forma de obtención de información y productos.

Antes del empleo de las imágenes de satélite para la elaboración de mapas de distribución de zonas cultivadas, los únicos registros espaciales disponibles eran series de mapas incompletos e imprecisos, y poco actualizados. De forma general, se llegó a asumir que la distribución de usos del suelo no merecía el esfuerzo de ser cartografiada debido principalmente a la fuerte dinámica de cambio asociada (Allan, 1990).

El empleo de imágenes espaciales proporciona una visión sinóptica sobre el territorio, permitiendo trabajar sobre grandes áreas de terreno de una manera eficaz, rápida y fiable, y consiguiéndose en muchos de los casos importantes reducciones en los costes de obtención de datos. Estos factores han ocasionado la extensión y popularización de la teledetección como fuente de datos, siendo varias de sus características las que la avalan como una técnica válida para la obtención de información de interés (Montesinos y Bea, 2008):

- *Objetividad.* Los datos suministrados son imágenes digitales (representación de un objeto mediante una matriz numérica bidimensional) obtenidas por agencias espaciales internacionales (ESA, NASA, etc...) y son accesibles comercialmente por cualquier ciudadano.
- *Continuidad de los datos.* Los datos aportados por los sensores digitales no son datos extrapolados o interpolados a partir de observaciones puntuales, como ocurre con las técnicas estadísticas, sino que son una discretización del espacio continuo observado, en unidades que se denominan píxel (de la contracción inglesa: *picture element* o elemento de la imagen) y que generan una imagen digital.
- *Periodicidad de las observaciones.* Debido a los modelos orbitales de los satélites, éstos sobrevuelan la misma zona cada cortos periodos de tiempo, por lo que nos permiten obtener observaciones periódicas de una zona.
- *Multiespectralidad de la observación.* Los sensores a bordo de los satélites captan los datos no sólo en la región del espectro visible (que es la que capta el ojo humano o la fotografía aérea), sino también en las regiones espectrales del infrarrojo, lo que nos permite “ver” cosas invisibles para el ojo humano.
- *Observación multiescala.* Con los satélites actualmente en órbita, y los sensores disponibles comercialmente para realizar teledetección aeroportada, pueden abordarse estudios a escalas de trabajo variables, que oscilan desde el 1:5.000.000 hasta el 1:500.
- *Bajo coste de adquisición de los datos.* Los precios de adquisición de imágenes varían considerablemente, pero en la mayor parte de las ocasiones resulta posible encontrar, a un precio competitivo, un sensor que proporcione los datos

necesarios para cubrir los requisitos de usuario propuestos. En la actualidad, el Plan Nacional de Teledetección, coordinado por el Instituto Geográfico Nacional del Ministerio de Fomento, trabaja para que las Administraciones Públicas accedan gratuitamente a gran parte de las imágenes de satélite disponibles.

Desde la década de 1970, los datos registrados a partir de la serie Landsat han constituido el núcleo central de un amplio conjunto de aplicaciones agrícolas, que comenzaron a desarrollarse en los Estados Unidos, donde varios programas centrados en la identificación e inventario de cultivos, se iniciaron de forma sincrónica al lanzamiento del primero de estos satélites. Así, se desarrollaron proyectos como el CBWE (*Corn Blight Watch experiment*) (MacDonald *et al*, 1972), con el objetivo de localizar los daños producidos por un hongo, que causó una importante plaga en cultivos de maíz, a través de imágenes aéreas combinadas con una campaña extensiva de campo; el LACIE (*Large Area Crop Inventory Experiment*) (MacDonald y Hall, 1978), cuyos objetivos se centraron en proporcionar información relacionada con el área plantada de cada tipo de cultivo y en estudiar su estado de salud; y AgRISTARS (*Agriculture and Resources Inventory Surveys Through Aerospace Remote Sensing*), donde se trabajó en la predicción de las cosechas de varios tipos de cereales a partir de series temporales de imágenes combinadas con una cantidad limitada de datos de campo. En general, estos proyectos no pudieron cumplir con todas las metas propuestas, pero contribuyeron decisivamente a poner en conocimiento de la comunidad científica varias de las posibilidades de la teledetección (US National Research Council, 2007). En particular, mostraron la capacidad del proceso digital de series temporales de imágenes multispectrales para la identificación precisa de cultivos y la realización de diversas estimaciones.

Durante los siguientes años, las posibilidades de generación de productos relacionados con la agricultura a partir de las imágenes de satélite, se popularizaron en otros países, como Australia, India o la Unión Europea.

La Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó en 1988 el proyecto MARS (*Monitoring Agriculture by Remote Sensing*), que sigue en funcionamiento en la actualidad, con objetivos renovados. Originalmente, fue diseñado para proporcionar información independiente y actualizada para la mejora de la gestión de las medidas relacionadas con la Política Agrícola Común (PAC). Sus objetivos han sido posteriormente ampliados para cubrir un mayor rango de servicios, que incluyen la predicción de cosechas, el control de ayudas y subvenciones, la evaluación de la seguridad alimenticia y la generación de datos de distribución de cultivos, producciones y estadísticas agrarias.

Al margen de los grandes programas impulsados por las agencias espaciales, el factor que influyó de forma más intensa en la extensión del uso de la teledetección entre investigadores y usuarios fue la rápida mejora tecnológica en el campo de la informática y la capacidad operativa de los ordenadores. De la mano de estas posibilidades, el

desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ha permitido avances fundamentales en el almacenamiento, análisis e integración de los datos espaciales georreferenciados.

Así, en el año 1990 ya se puede encontrar un compendio de aplicaciones de la teledetección en agricultura (Steven and Clark, 1990) en el que los estudios recopilados son agrupados en cuatro categorías: clima y suelo, inventario de cultivos y clasificación de usos del suelo, predicción de la productividad de cosechas y estrés de la vegetación. La temática de las aplicaciones resulta aún de actualidad, lo que puede dar una idea de la profundidad de las líneas de investigación abiertas en el campo de la agronomía a partir del empleo de los datos facilitados por los sensores aeroespaciales.

Ese mismo año se publica en España el primer estudio específico centrado en la delimitación de superficies regadas a través de teledetección (Montesinos, 1990) y un año después, ya se imparte en nuestro país un curso de postgrado sobre teledetección y recursos naturales, centrado en la agricultura (Gandía y Meliá, 1991).

Las aplicaciones desarrolladas en los últimos cuarenta años que podemos encontrar en la bibliografía relativas al uso de la teledetección en relación a la agricultura son realmente amplias, habiendo adquirido con el tiempo un mayor componente operativo, lo que las ha convertido en una herramienta habitual entre planificadores, gestores y agricultores.

Estas aplicaciones pueden ser divididas en varios grupos, de acuerdo a su temática principal:

#### **i) Elaboración de mapas de usos del suelo e inventarios de cultivos**

Quizás, la aplicación más intuitiva de la teledetección es la generación de mapas que recojan las observaciones realizadas desde sensores con amplia capacidad de visualización de un territorio. La disponibilidad de imágenes con una resolución espacial suficiente ha supuesto una auténtica revolución en el campo de la cartografía temática de usos del suelo. La lista de estudios y trabajos realizados sería prácticamente inacabable, englobando cartografías generadas a diversas escalas de trabajo (empleando desde satélites meteorológicos hasta datos de muy alta resolución espacial), sobre áreas de tamaño muy variable (desde estudios con carácter global hasta zonas de detalle) y con diferente grado de automatización en los procesos. La importancia de la información que es posible obtener se encuentra ampliamente reconocida.

En relación a los usos del suelo, cabe destacar la disponibilidad de datos sobre toda Europa a través de los proyectos *CORINE*, que sirvieron para producir mapas de usos del suelo a escala 1:200.000 para el año 1990 y 1:100.000 para el año 2000; y para España, a través del proyecto *SIOSE*, mediante el cual se están generando mapas a escala 1:10.000 a partir de imágenes de satélite del año 2005, complementadas con trabajo específico de campo.

Los inventarios de cultivos requieren una mayor actualización y esfuerzo en su elaboración. Aunque son muchos los organismos, con competencias varias y a diferentes ámbitos administrativos, que trabajan en la obtención de esta información, a menudo los mapas disponibles no tienen el detalle suficiente o no contienen la información necesaria para su empleo en aplicaciones operativas. No obstante, el uso de técnicas de teledetección se ha convertido en la técnica de referencia para la elaboración de mapas de distribución de cultivos. En España, se dispone de un mapa de parcelas agrarias y tipología general de cultivos integrada en el SIGA (Sistema de Información Geográfico Agrario), así como de mapas de cultivos y aprovechamientos a escala 1:50.000. En ambos casos, el volumen de información disponible resulta muy importante, si bien presenta los inconvenientes antes comentados.

## **ii) Estimación y análisis de producción de cosechas**

El empleo de datos de teledetección para la predicción de la producción a nivel regional ha sido una de las aplicaciones de mayor interés para los gestores agrícolas. Se han desarrollado numerosos estudios a diferentes escalas de trabajo, oscilando desde la regional hasta la continental, y basándose fundamentalmente en la relación existente entre los índices de vegetación y parámetros tales como la eficiencia de uso de la luz por parte de las plantas (LUE) o el índice de área foliar (LAI) (Kanemasu *et al*, 1990). Dado que en la mayoría de los cultivos la productividad guarda una relación directa con el nivel de desarrollo de la cubierta vegetal, resulta posible, a través de modelos de productividad, establecer relaciones entre la cantidad de biomasa y variables de tipo espectral extraídas de imágenes de satélite (Bouman, 1995).

En Europa, existe en el momento actual un proyecto activo dentro del programa MARS dedicado específicamente a la predicción de la biomasa de cosecha de diversos cultivos con objeto de abordar las necesidades de información fiable y actualizada propias de las políticas de planificación y gestión de la Política Agraria Común (PAC). Este proyecto, denominado AGRI4CAST, integra datos periódicos de teledetección con observaciones meteorológicas, herramientas de análisis estadístico y modelado agronómico.

En el ámbito local, la incorporación de ordenadores de “a bordo” en las máquinas recolectoras ha permitido incluir la teledetección como una de las variables principales para el análisis de la variabilidad en la biomasa existente dentro de las explotaciones (López-Lozano *et al*, 2008) y como base para el diseño de acciones específicas encaminadas a la mejora de la producción (Hall *et al*, 2002).

## **iii) Estudio de daños por fenómenos naturales**

La existencia de periodos de sequía o de afecciones puntuales debidas a fenómenos naturales tiene un fuerte impacto sobre las cosechas, pudiendo llegar a producir pérdidas totales. Estas incidencias tienen una fuerte presencia dentro de la cultura agrícola,

empleándose la teledetección para conocer y cuantificar los efectos producidos por este tipo de episodios.

El efecto de las sequías suele estimarse a partir de series amplias de imágenes basándose en dos metodologías diferentes: el estudio de la inercia térmica aparente a partir de medidas en la región del infrarrojo emitido (Price, 1982) y el análisis de la variación temporal de los índices de vegetación para la detección y seguimiento de las sequías (Kogan, 1995; Thenkabail *et al*, 2004).

El análisis de los daños y consecuencias derivados de fenómenos climáticos concretos se realiza a partir de procesos de análisis de cambio, existiendo numerosos ejemplos relacionados con avenidas e inundaciones (Smith, 1997), donde se ha cartografiado la zona inundada a partir de imágenes de satélites e incluso analizado la evolución diacrónica de la crecida (Losada *et al*, 2004); y con el estudio de afecciones por heladas, pedrisco o temporales sobre los cultivos (Gilabert *et al*, 1990; Erena *et al*, 2009), proporcionando datos para la estimación de daños.

#### **iv) El riego: necesidades y eficiencia**

El riego constituye una de las prácticas agrícolas de mayor importancia en cuanto a la generación de valor añadido y a la gestión de recursos. Por eso, no es de extrañar que la búsqueda de herramientas para optimizar la eficiencia del regadío haya sido una constante a lo largo del tiempo. La teledetección espacial ha aportado nuevas líneas de actuación basadas en el empleo de series de imágenes multiespectrales para la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos a lo largo de su ciclo fenológico.

La evaluación cuantitativa de los procesos de transferencia existentes entre suelo, vegetación y atmósfera a partir de datos derivados de medidas de teledetección ha supuesto un mejor entendimiento de la relación entre crecimiento de los cultivos y gestión del riego (Bastiaansen *et al*, 2000). En este sentido, los modelos de transferencia radiativa, alimentados con datos de teledetección, han supuesto un avance considerable en el conocimiento del comportamiento a gran escala.

Para trabajos que requieran el asesoramiento o control del riego a nivel de parcela, se ha popularizado la metodología basada en el uso de la teledetección para la estimación de la evapotranspiración de la cubierta vegetal mediante el seguimiento del coeficiente de cultivo (González-Piqueras, 2006; González-Dugo *et al*, 2009). Este proceso permite ajustar las dotaciones aplicadas a los cultivos a las dotaciones teóricas óptimas en función de su estado fenológico (Allen *et al*, 2000), que es caracterizado y monitorizado a partir de series temporales de imágenes.

#### **v) Agricultura de precisión**

Dentro de esta etiqueta, se agrupan las metodologías de mejora en la gestión agraria a nivel de detalle (ámbito de parcela o intraparculario) y que se sustentan en el empleo de

herramientas tecnológicas para la recogida y gestión de un número elevado de datos relacionados con la variabilidad de las condiciones de cultivo.

Las tecnologías empleadas incluyen sistemas de posicionamiento global, teledetección (principalmente a partir de datos multispectrales de muy alta resolución espacial), sensores para la toma y transmisión de datos en tiempo real, e incorporación de sistemas informáticos en la maquinaria agrícola para un mayor control de las actividades en campo.

Los objetivos principales de la agricultura de precisión se centran en la mejora de la calidad de las producciones y en la reducción de los efectos ambientales derivados de la actividad agrícola (Zhang *et al*, 2002). La gestión de las variables con incidencia de los resultados agrícolas suele abordarse desde enfoques basados en el análisis espacial de mapas que contienen los datos de interés. Las aplicaciones operativas resultan abundantes, como delimitación de unidades de manejo diferenciado (Bramley y Lamb, 2003; Santesteban *et al*, 2009), mejora en los procesos de muestreo, control de parámetros relacionados con el riego (Alvárez *et al*, 2006), detección de estrés hídrico a nivel de planta (Suárez *et al*, 2009), cartografía de malas hierbas y de zonas afectadas por plagas (Lobitz *et al*, 1997; López-Granados *et al*, 2008) o mejora de la calidad en las cosechas (Johnson, 2001).

### **2.2.2. Uso de la teledetección para la cuantificación de superficies regadas**

Dentro del rango de las aplicaciones, genéricamente descritas, de la teledetección en el campo de la agricultura, resulta conveniente profundizar en el uso de datos de Observación de la Tierra en la cuantificación de superficies regadas, dados los objetivos de este trabajo de investigación.

Los mapas de distribución de cultivos constituyen una herramienta fundamental en los procesos de análisis, planificación y gestión del territorio. La disponibilidad actual de fuentes de datos geográficos facilita la elaboración y actualización periódica de este tipo de mapas, multiplicando las posibilidades de obtención de información relacionada con la distribución y variación de los usos del suelo dentro de un área determinada.

La información sobre la evolución y el estado actual de ocupación del suelo permite realizar análisis de la relación entre la aplicación de diferentes políticas y los procesos geográficos acaecidos dentro de un área de interés. En particular, el conocimiento en detalle de la distribución de cultivos regados sobre el territorio en un determinado periodo de tiempo, posibilita el análisis del grado de control y de cumplimiento de medidas ligadas a políticas de ordenación del territorio y de planificación agraria, hídrica y de conservación del medio natural.

Sin embargo, los resultados de un reciente proyecto de investigación (Ozdogan *et al*, 2010) arrojan una cifra exigua de 65 trabajos publicados en “*revistas de impacto*”



basados en el uso de la teledetección para la determinación de superficies regadas, frente a los miles existentes para el análisis de características agrícolas y la cartografía de usos del suelo. Esta situación se motiva por la necesidad de combinar adecuadamente el componente técnico y metodológico con un conocimiento práctico y operativo de las características, dinámica y calendario del riego de cultivos, lo que introduce una mayor complejidad en relación a la identificación de otros usos del suelo.

#### *2.2.2.1. Aspectos metodológicos*

El número de estudios orientados al planteamiento de metodologías genéricas para la discriminación de cultivos, así como a su aplicación en condiciones locales resulta muy variado, englobándose la discriminación de cultivos regados dentro de esta temática. La disponibilidad de una serie de misiones de satélites comerciales (Landsat, SPOT, IRS,...) con resolución espacial, temporal y espectral suficiente para la identificación de parcelas cultivadas ha proporcionado una fuente de datos realmente útil para el inventario de cultivos en regadío a escala de cuenca hidrográfica.

Dentro del tratamiento digital de las imágenes de satélite se pueden abordar distintas metodologías operativas para la cuantificación de las superficies en regadío detectadas por teledetección, que principalmente se basan en la clasificación multispectral o en el cálculo de índices espectrales, (Montesinos y Bea, 2008; Ozdogan *et al*, 2010) existiendo igualmente enfoques mixtos. En todos los casos, debe asumirse que el riego puede ser detectado debido a su necesidad para la supervivencia del cultivo en las condiciones ambientales existentes o por los propios efectos que produce sobre los cultivos (Alexandridis *et al*, 2008).

#### **i) Técnicas de clasificación de imagen**

Bajo esta etiqueta suelen recogerse los procesos digitales orientados a la segmentación de una imagen en unidades que responden a una leyenda temática que identifica características de un territorio. El proceso de clasificación se divide en dos fases: el *entrenamiento*, donde se identifican los datos y criterios que servirán para llevar a cabo la segmentación, y la *asignación*, donde se realiza propiamente el proceso de clasificación acorde a las características espectrales de las imágenes y los datos generados durante la fase anterior.

Las técnicas de clasificación multispectral son comúnmente divididas entre supervisadas y no supervisadas (automáticas) (Richards, 1993), dependiendo del tipo de interacción existente entre usuario y sistema durante la fase de entrenamiento. Ambos tipos de aproximaciones requieren de un trabajo previo de campo para la toma de una cantidad de muestra que permita la identificación de una superficie significativa de los principales cultivos de interés.

En el caso de las técnicas supervisadas, una parte de la muestra de campo se emplea para el establecimiento de relaciones multivariantes entre el dato de campo y los datos multiespectrales disponibles, con objeto de usar un algoritmo concreto para la clasificación de las restantes zonas de la imagen dentro de las categorías establecidas. Esta metodología ha sido comúnmente aceptada, hasta tal punto que resulta frecuente que se recojan ejemplos de procesos de clasificación supervisada de cultivos en manuales y libros especializados (Thomas, 1987) y que esta técnica sea enseñada y practicada con casos reales dentro de muchos cursos especializados de teledetección.

En los procesos de clasificación no supervisada, el intérprete únicamente indica el número de clases de la leyenda temática final, realizándose el proceso de asignación de forma automática, en función de la separabilidad de los valores multiespectrales registrados en las imágenes. La información de campo se emplea para la identificación de los tipos de cultivos existentes. Aunque esta técnica ha sido empleada en situaciones diversas para superar ciertas limitaciones o por su mayor capacidad de integración con datos auxiliares (Lark, 1995; Cohen y Shosgany, 2002), el empleo de técnicas supervisadas resulta más frecuente y extendido.

Sin embargo, la división entre metodologías supervisadas y no supervisadas resulta una simplificación útil para realizar una primera aproximación a los tipos de procesos de clasificación, cuya división puede llegar a resultar mucho más compleja.

Con independencia del tipo de metodología general elegida para la fase de entrenamiento, resulta necesario definir un algoritmo o proceso, que será empleado durante la fase de asignación. En esta fase se produce la toma de decisión relacionada con la identificación de la categoría de la leyenda donde se incluye cada elemento de imagen. Esta toma de decisión (que constituye el núcleo del proceso de clasificación) se basa en los datos de imagen y en la información generada durante la fase de entrenamiento, pero se halla directamente condicionada por el tipo de algoritmo o razonamiento utilizado. Así, de manera análoga a cualquier proceso de toma de decisión cotidiano, donde se puede llegar a situaciones o conclusiones diferentes a partir de un mismo punto de partida, el proceso de asignación puede producir resultados distintos dependiendo del algoritmo o metodología empleada y de los criterios aplicados.

Por este motivo, resulta crítico que toda clasificación vaya posteriormente acompañada de un proceso de validación de resultados y de estimación de los niveles de confianza asociados.

Los algoritmos o metodologías de asignación resultan muy variados, encontrándose abundantes ejemplos de su empleo para la clasificación de cultivos (Martínez-Beltrán, 2001; Janssen y Middelkoop, 1992; Barbosa *et al*, 1996; Oetter *et al*, 2001; Smits *et al*, 1999; Murthy *et al*, 2003). Entre los procesos más frecuentes se podrían remarcar (Chuvienco, 2008) los clasificadores de mínima distancia, de paralelepípedos, de probabilidad (donde destacan los algoritmos de máxima verosimilitud y la distancia de

Mahalanobis), las redes neuronales, los árboles de decisión, los clasificadores de contexto, y los algoritmos de lógica difusa (o lógica *fuzzy*).

Además, la creciente disponibilidad de datos con mayores resoluciones de tipo temporal, espacial, radiométrico, angular y espectral están dando lugar a nuevos enfoques que permiten mejoras evidentes en los resultados obtenidos y que además pueden llegar a ser combinados en aproximaciones metodológicas válidas para afrontar estudios con un carácter específico.

Así, el empleo de series de imágenes en el proceso de clasificación permite el seguimiento de patrones temporales y el análisis de cambios, lo cual resulta muy útil como información de apoyo para la caracterización de elementos de interés. La disponibilidad y accesibilidad de datos espaciales, a menor coste y adquiridos regularmente a lo largo de la campaña de cultivo, proporciona, sin duda, una valiosa información directamente relacionada con los cambios en la fenología de los cultivos. El análisis integrado de series temporales de imágenes permite la discriminación fiable de cultivos que difícilmente podrían identificarse a partir del análisis aislado de cualquiera de las fechas de la serie (Lillesand and Kiefer, 1979). La delimitación de patrones temporales puede llegar a tener un enfoque multi-anual (Martínez-Casasnovas *et al*, 2005), posibilitando la generación de información auxiliar útil para el proceso de asignación.

El aumento de resolución espacial de las imágenes de satélite y la extensión del uso de sensores aeroportados han propiciado el desarrollo de métodos de análisis de patrones y texturas de imagen, así como de clasificadores de contexto.

Los procesos de clasificación permiten agrupar los píxeles de una imagen en una serie de grupos definidos en una leyenda temática de acuerdo a sus características. De manera tradicional, estos procesos se han basado únicamente en la agrupación de píxeles según su respuesta espectral o reflectancia en las bandas consideradas. Si bien, esta aproximación sigue resultando la base de los procesos de clasificación, el empleo de imágenes de muy alta resolución espacial ha motivado la inclusión de nuevos parámetros de análisis complementarios, que van más allá de la clasificación individual de píxeles en un espacio n-dimensional. Estos parámetros se refieren a las relaciones existentes entre cada píxel y todos aquellos que lo rodean y tienen en cuenta criterios de textura, de vecindad y de forma entre diferentes píxeles.

El uso de algoritmos diseñados para trabajar con imágenes de menor resolución espacial sobre datos de mayor detalle, produce en muchos casos resultados más pobres debido a la aparición de una alta fragmentación en los datos obtenidos. La solución a este problema pasa por la caracterización de cada píxel en función de la organización espacial, de forma que se tenga en cuenta dentro de los procesos de asignación tanto la firma espectral como la textural. La observación de la textura depende de dos factores: uno es la escala de variación que se va a considerar como “textura”, y la otra es la escala de observación. La herramienta más empleada para el análisis de ambos factores es la

llamada matriz de Co-Ocurrencia (Haralick *et al*, 1973), que permite derivar un conjunto de elementos para la caracterización textural de la imagen.

En la Figura 2 se muestran ejemplos gráficos de la información generada a partir de parámetros texturales, útil para mejorar los resultados del proceso de clasificación.

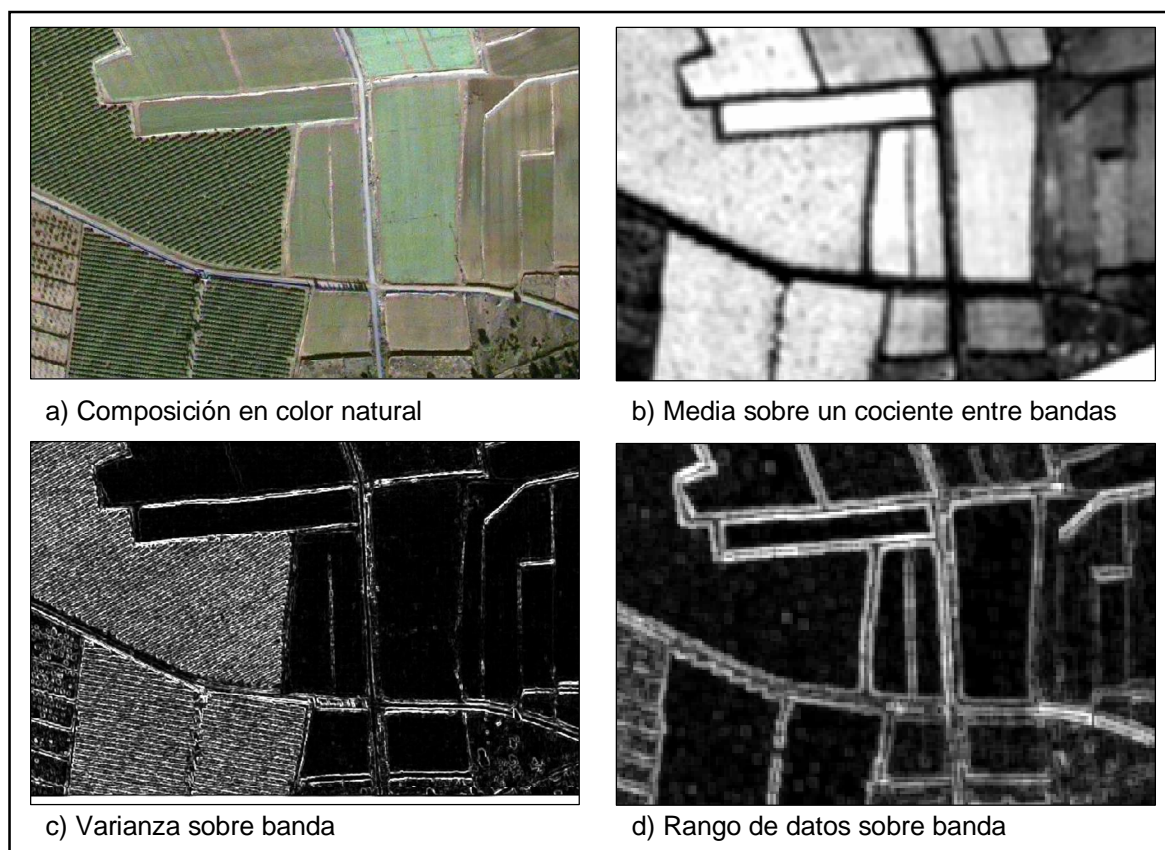


Figura 2. Ejemplos de mapas texturales. Se recogen tres tipos diferentes de mapas numéricos (imágenes b, c y d) obtenidos a partir del análisis textural de imagen, y que ayudan a la segmentación de los cultivos que se observan en la imagen a, que se dividen entre hortícolas y cultivos leñosos (cítricos y olivos) con diferente marco de plantación.

La mayor resolución radiométrica, favorece la separabilidad entre los diferentes elementos a clasificar, ya que permite una mejora en la cuantificación de la respuesta de reflectancia medida por los sensores.

Por último, la mejora en la resolución espectral ha venido de la mano de sensores hiperespectrales, que registran la información en canales estrechos de medida de la longitud de onda reflejada. Las técnicas de clasificación de imágenes hiperespectrales (basadas frecuentemente en clasificadores angulares) presentan amplias diferencias frente a las propias de las imágenes multispectrales, permitiendo una aproximación más ajustada a la firma espectral característica de las diferentes superficies bajo análisis. No obstante, la falta de disponibilidad de imágenes, su coste y su mayor dificultad de tratamiento impiden que este tipo de dato pueda tener un mayor peso dentro de procesos operativos, quedando su uso frecuentemente restringido al ámbito de la investigación.

La resolución espectral, considerada de forma global, también se ha visto incrementada por la mayor disponibilidad de sensores operando en los rangos del infrarrojo térmico y radar, que proporcionan información integrable con datos obtenidos a partir de imágenes multispectrales que recogen la respuesta de la radiación reflejada en longitudes de onda menores (Lobo *et al*, 1995).

Los ejemplos de estudios enfocados a la clasificación de cultivos en regadío resultan variados, encontrándose aproximaciones basadas en clasificación de tipo supervisado (Richards, 1993; Casterad y Martín-Ordoñez, 2004) o de tipo no supervisado (Pons *et al*, 2005), y en metodologías mixtas que integran análisis textural (Yi *et al*, 2008), que emplean caracterizaciones de firmas espectrales derivadas de series temporales amplias de imágenes (Simonneaux *et al*, 2008) o que jerarquizan diferentes procesos de clasificación en función del estudio de parámetros múltiples espacio-temporales que marcan la separabilidad entre las clases (Thenkabail *et al*, 2005).

Los trabajos en que se comparan diferentes métodos de clasificación (Cachorro *et al*, 2001) muestran que, de manera general, no existe un tipo de algoritmo que ofrezca mejores resultados que los demás, pudiéndose obtener resultados satisfactorios siempre que el proceso elegido se aplique dentro de una metodología correctamente diseñada.

## **ii) Índices de vegetación**

El análisis mediante Índices de Vegetación (IVs) resulta la base de un número importante de metodologías orientadas al inventario y caracterización de cultivos.

Los índices de vegetación se definen, de forma genérica, como algoritmos que permiten el cálculo de parámetros relacionados con la vegetación a partir de valores de reflectividad a distintas longitudes de onda (Gilbert *et al*, 1997). El índice más empleado es el denominado NDVI (*Normalised Difference Vegetation Index*) (Rouse *et al*, 1974) y que se calcula a partir de la diferencia normalizada entre las bandas del infrarrojo próximo y el rojo. Ambas bandas son las más frecuentemente empleadas para el diseño de índices de vegetación:

- El rojo visible (r), por registrar la energía reflejada en la región en la que los pigmentos clorofílicos de la vegetación alcanzan su máximo de absorción. Las plantas verdes y vigorosas, con altas tasas de actividad fotosintética, absorben una cantidad considerable de la luz que les llega dentro de este rango, siendo reducidos los valores de la radiación reflejada. Esto hace que las superficies con cultivos en regadío sean identificables en esta banda del espectro por presentar una reflectancia baja en relación al resto de superficies.
- El infrarrojo reflejado próximo (irc), directamente relacionado con el índice de área foliar – LAI (*Leaf Area Index*)- y con la densidad de vegetación verde (García-Haro *et al*, 1996). Las superficies terrestres con alta densidad de biomasa reflejan un porcentaje elevado de la radiación que reciben. Este hecho se debe a la

existencia de una cutícula cerosa externa que refleja la radiación, así como a la propia estructura interna de las hojas, donde el mesófilo contribuye especialmente a la reflexión de la radiación en este rango de longitud de onda (Gandía, 1990).

En general, los índices empleados para el estudio de parámetros biofísicos relacionados con la vegetación, suelen derivarse a partir de bandas “anchas”, que recogen la respuesta en cientos de nanómetros dentro de la región óptica del espectro electromagnético.

Las principales ventajas del empleo de los índices de vegetación se centran en su simplicidad de elaboración, la reducción del volumen de datos a procesar, en la extensión de su uso y en su objetividad. En contra, la influencia que introducen factores difícilmente controlables como el suelo, la atmósfera y la configuración de la observación e iluminación.

El número de índices propuestos en diferentes estudios resulta muy amplio y la elección de uno u otro para acometer un determinado estudio no siempre resulta sencillo. Los índices encontrados de forma más frecuente en la literatura pueden ser clasificados dentro de los siguientes grupos en función de su diseño y de características singulares relacionadas con su objetivo (Rondeaux *et al*, 1996):

- Índices intrínsecos: que únicamente tienen en cuenta los valores de reflectividad medidos en las bandas del rojo e infrarrojo próximo y que son calculados a partir de cocientes aritméticos. En esta categoría encontramos el NDVI y el RVI (Pearson y Miller, 1972), que se define como el cociente entre las bandas del infrarrojo cercano y el rojo.
- Índices basados en la línea de suelo: definidos a partir de una línea que marca la respuesta del suelo desnudo con objeto de reducir la influencia del terreno. La línea de suelo se construye a partir de la relación entre las reflectividades de las bandas *r* e *irc* para los suelos desnudos, que varía de forma aproximadamente lineal según lo hacen parámetros tales como su color, brillo, humedad o rugosidad (Gilabert *et al*, 1997). En este grupo destacan el PVI (*Perpendicular Vegetation Index*); (Richardson and Wiegand, 1977), que mide la mínima distancia a la línea del suelo y el SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*), definido por Huete en 1988, y que introduce una variable dependiente de la densidad de la cubierta vegetal para conseguir una mejor diferenciación de la respuesta propia de la vegetación. Posteriormente, han surgido numerosas adaptaciones de este último índice, entre las que destacan el TSAVI (Baret and Guyou, 1991), el WDV (Clevers and Verhoef, 1993) o el MSAVI (Qi *et al*, 1994). En general, todos estos índices introducen diferentes ajustes para representar las isolíneas que unen puntos con un mismo índice de área foliar.

- Índices de reducción de efectos atmosféricos: enfocados a la limitación de la distorsión atmosférica, y que en muchas ocasiones resultan modificaciones directas de los índices anteriormente expuestos, incluyendo parámetros dependientes del contenido en aerosoles o de las condiciones de iluminación.

En general, los IVs presentan relaciones robustas con parámetros biofísicos propios de la vegetación, lo que permite su empleo para el análisis temporal y la estimación de las características en un momento de referencia de cultivos y masas de vegetación. El conocimiento que respalda esta afirmación se basa en las siguientes relaciones:

Los índices de vegetación (y especialmente el NDVI) se encuentran fuertemente correlacionados con la fracción de cubierta vegetal (González-Piqueras, 2006). Este parámetro caracteriza la cantidad de interacción existente entre la cubierta vegetal y el suelo, con la radiación, variando según se van desarrollando las diferentes etapas fenológicas del cultivo.

La evolución temporal del valor de los IVs para un cultivo se encuentra linealmente relacionada con el coeficiente basal de cultivo (Kcb) (Bausch and Neale, 1977). Así, el análisis de la firma temporal de un índice permite estimar las necesidades hídricas de los cultivos mediante su equiparación a la evapotranspiración máxima, que se produce en condiciones de óptimo desarrollo, sin la presencia de ningún factor limitante.

Los índices de vegetación se relacionan con la producción primaria, medida en forma de biomasa seca, por medio de modelos de eficiencia del uso de la luz, denominados modelos LUE (Gower *et al*, 1999), que siguen el siguiente esquema.

$$P = \int_0^t (a \cdot \text{NDVI} + b) \cdot \text{PAR} \cdot \varepsilon \cdot W \cdot dt \quad [\text{Ecuación 1}]$$

donde P es la producción primaria, PAR es la radiación fotosintéticamente activa,  $\varepsilon$  es el coeficiente de eficiencia de la planta, y W es un coeficiente de estrés hídrico.

De esta manera, el total de biomasa podría ser estimado a partir de la suma acumulativa de valores de NDVI (Yang, 1998). Esta aproximación queda reforzada por el hecho de que se haya encontrado a su vez, una relación lineal entre los IVs y la fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida por la planta ( $f_{\text{APAR}}$ ) (Asrar *et al*, 1984; Sellers *et al*, 1997).

El índice NDVI se relaciona mediante una función exponencial con el Índice de Área Foliar (LAI) (Gilabert *et al*, 1996; González-Piqueras, 2006). Esta relación, comprobada experimentalmente, se sustenta en base a modelos de la interacción entre radiación y cubierta vegetal que permitan caracterizar las relaciones existentes entre LAI y la fracción de cubierta vegetal. La variación en el índice LAI es conocida como una de las primeras respuestas de la planta ante el estrés ya que se relaciona con el intercambio de energía desde la cubierta vegetal activa (Fassnacht y Gower, 1997).

La relación entre IVs y LAI depende de forma intensa de la arquitectura de la cubierta vegetal. Así, para conseguir una estimación adecuada del LAI resulta necesario realizar un proceso de inversión sobre un modelo de la reflectancia vegetal. Para ajustar las condiciones de observación suelen emplearse aproximaciones empíricas para el ajuste local entre valores de IVs y LAI (D'Urso, 2001).

Por otro lado, habría que considerar otra familia de índices enfocados a la estimación del contenido de humedad de las cubiertas vegetales y a la delimitación de cuerpos de agua y de vegetación presente en zonas inundadas, que normalmente se conocen como índices de contenido en agua de la vegetación (*Vegetation Water Content Indices*). Estos índices utilizan bandas que registran la respuesta de la radiación reflejada en los rangos del infrarrojo próximo y medio (o de onda corta), habiéndose identificado tres regiones de longitud de onda (950–970, 1150–1260 y 1520–1540 nm) donde se producen las mejores correlaciones entre respuesta espectral y contenido en humedad (Sims y Gamon, 2002). Esta familia de índices, entre la que destacan el LMI (*Leaf Moisture Index*), el NDWI (*Normalised Difference Water Index*) (Gao, 1996) o el PWI (*Plant Water Index*) (Peñuelas *et al*, 1997), presenta una relación con el contenido de agua en las hojas como han demostrado estudios que los integran junto a análisis de regresión y modelado de transferencia radiativa (Zarco-Tejada *et al*, 2003) y muestra una sensibilidad apreciable para la detección de cambios en el contenido de agua de las cubiertas vegetales.

#### 2.2.2.2. Aspectos operativos y ejemplos de aplicación

Las cubiertas vegetales en regadío, en estado de desarrollo óptimo y ausencia de estrés hídrico, se caracterizan por:

- altas tasas de actividad fotosintética, debido a que la disponibilidad de agua no aparece como factor limitante y a las mayores tasas de crecimiento que presenta un cultivo cuando es regado,
- una mayor densidad de cubierta vegetal frente al mismo cultivo en seco, que a menudo queda, además, reforzada por una mayor densidad de siembra o un marco de plantación más reducido,
- un mayor espesor del contenido en agua en hoja y en sus estructuras vegetativas.

Los efectos que el riego produce sobre el cultivo son generalmente suficientes para posibilitar su discriminación a partir de las respuestas registradas en los índices de vegetación y de contenido de agua, siempre y cuando se trabaje, con datos de partida y bajo criterios, adecuados.

La estimación de superficies de regadío mediante teledetección en una zona de estudio presenta unas consideraciones generales y “*condiciones de contorno*” que deben ser tenidas en cuenta a la hora de interpretar los resultados obtenidos:



- *Ciclo vegetativo de los cultivos existentes en la zona de estudio.* El análisis del desarrollo vegetativo de los cultivos existentes permite determinar las fechas de imágenes de satélite, necesarias y suficientes, que se deben adquirir para identificar dichos cultivos. Así, un cultivo herbáceo, será captado por el sensor, tanto en cuanto haya alcanzado un desarrollo vegetativo, que permita que cubra el suelo y por lo tanto la señal captada sea la de la vegetación y no la del suelo o mezcla de ambas. En un cultivo leñoso, la situación es similar y plantas muy jóvenes, con una masa foliar pequeña, generalmente no podrán ser identificadas, ya que el sensor va a captar una señal mayoritariamente de suelo y no de vegetación. En la viña, la situación es todavía más delicada, ya que hay que esperar que la vid tenga hoja y que los sarmientos de la planta cubran el suelo, para que la señal sea la propia de vegetación y no la del suelo.
- *La heterogeneidad de la zona de estudio.* Esta característica condiciona significativamente las culturas agrícolas existentes en la zona, que por regla general se adaptan a la variabilidad existente. La diversidad climática y de condiciones ambientales debe considerarse en el diseño metodológico a emplear. Debe tenerse en cuenta que en áreas no demasiado alejadas entre sí, la evolución fenológica y las prácticas agrícolas sobre un mismo cultivo pueden presentar diferencias considerables. En zonas de alta heterogeneidad puede resultar necesario realizar procesos de segmentación del territorio y trabajar con un mayor número de imágenes.
- *El grado de parcelación.* Un elevado grado de parcelación y un tamaño reducido de las parcelas condiciona la existencia de píxeles de borde, donde se produce la mezcla de 2 o más clases espectrales. Esto hace que la respuesta registrada en las parcelas no tenga una distribución unimodal, lo que dificulta la extracción de información mediante clasificadores multispectrales.
- *Tamaño de la zona de estudio.* Esta característica va a condicionar el tipo de imágenes de satélite que vamos a adquirir, en términos de coste económico y escala de trabajo.
- *Escala de trabajo.* Los resultados derivados de teledetección presentan una escala final de trabajo derivada de la resolución espacial de las imágenes de partida. La escala de trabajo de los mapas finales debe ajustarse a las necesidades de los usuarios de la información generada.

Existen numerosos trabajos y estudios relacionados con la obtención de mapas de superficies regadas a partir de teledetección. Así, resulta posible encontrar desde un mapa global de superficie regada en el planeta, elaborado a partir de técnicas de teledetección por el IWMI (*International Water Management Institute*) con una resolución de 10 km y basado en la integración de series temporales de datos (Thenkabail *et al*,

2006), hasta trabajos realizados sobre áreas reducidas a partir de vuelos multiespectrales o hiperespectrales de muy alta resolución espacial efectuados en una fecha concreta.

Dentro de nuestro país, los estudios para la cuantificación de superficies regadas (Barón, 1995; Quintanilla *et al*, 1997; Montesinos *et al*, 1997; Calera *et al*, 1999; Gumiel *et al*, 1999; Montero *et al*, 2005) se encuentran enfocados en cuencas hidrográficas, subcuencas, unidades hidrológicas ó áreas de actuación de comunidades de usuarios de aguas superficiales o subterráneas, empleándose datos provenientes de sensores de alta resolución (Landsat, SPOT, IRS...) y generándose mapas con leyendas temáticas variadas y escalas métricas de trabajo entre 1:50.000 y 1:150.000.

Sin embargo, nos encontramos en una situación en la que, aunque la tecnología se encuentra disponible y existen metodologías desarrolladas y validadas, el empleo de técnicas de teledetección para la cuantificación de superficies regadas no se encuentra ampliamente extendido. A pesar de la importancia del conocimiento de la distribución de las superficies regadas, y de que la teledetección es una herramienta efectiva, rápida y económica para obtener este tipo de información, en muchas Confederaciones Hidrográficas y Consejerías de Agricultura de las Comunidades Autónomas estos datos no existen o no están disponibles (Llamas, 2006). La barrera existente entre científicos y gestores resulta evidente, y no podrá ser derribada mientras no se ponga mayor énfasis en la necesidad de adaptar los resultados a las necesidades de los usuarios, en realizar validaciones de la calidad de los mapas proporcionando intervalos de confianza ajustados, y en diseñar aproximaciones metodológicas ajustadas a las condiciones particulares de cada territorio.

Los trabajos de índole científica realizados para la detección de superficies regadas a partir de técnicas de teledetección dentro de la Cuenca Alta del Guadiana resultan limitados.

Este hecho llama la atención, especialmente si se tiene en cuenta que en el año 1990 (Montesinos, 1990), se realizó un primer trabajo en el que se describe una aproximación metodológica completa para la delimitación de superficies ocupadas por cultivos herbáceos de alta dotación, aplicada sobre la zona central del acuífero de La Mancha Occidental.

Posteriormente, en el periodo entre 1997 y 1999 se llevó a cabo el proyecto ASTIMwR, (*Application of Space Techniques to the Integrated Management of a river basin Water Resources*) encuadrado dentro del IV Programa Marco de I+D y que constituye el primer proyecto financiado por la Comisión Europea centrado en el empleo de la teledetección como herramienta para la mejora de la gestión de los recursos hídricos subterráneos.

Dentro de este proyecto y al efecto del tema de esta revisión, resultan especialmente interesantes dos de sus cuatro módulos, concretamente los referidos a la extracción de aguas subterráneas y a la monitorización de la eficiencia de riego.

El primero de los módulos trata de definir la distribución del consumo de agua en el espacio y tiempo, para lo cual trata de generar información fiable sobre cuestiones relacionadas con quién riega, cuándo, dónde, qué cultivo y con cuánta agua. Esta aproximación se basa en la integración, en un contexto operativo, de mapas obtenidos a partir de índices de vegetación y una posterior clasificación supervisada de mapas de superficie regada y de bases gráficas de datos con información administrativa de las parcelas.

Por otro lado, en el módulo relacionado con el control de la eficiencia de riego, se ensaya una aproximación para la elaboración del mapa de cultivos dentro de la Zona Regable de Peñarroya, en la que se prueban metodologías diferentes de agrupación estadística de respuestas espectrales. La validación de los resultados se centra en la medición de un índice de separabilidad (índice de Jeffries-Matusita), y en la realización de un análisis de fiabilidad mediante procesos de aplicación de umbrales y enmascarado. La mayor fiabilidad se obtiene para el proceso de clasificación supervisada elaborado con el algoritmo de máxima verosimilitud sobre la serie multitemporal de mapas de índice de vegetación (NDVI).

En 2001, se presentó una tesis doctoral con el título de “Desarrollo de un modelo de balance de agua en los suelos de Castilla - La Mancha sobre un SIG: condiciones de aplicación y limitaciones” (Vela, 2001), que abarca como área de estudio el municipio de Daimiel y que aborda el uso de técnicas de teledetección y análisis espacial para la obtención de los datos necesarios para alimentar un modelo de balance hídrico.

El mapa de cultivos regados empleado en el estudio se generó a partir de la integración de datos extraídos de una serie de imágenes de satélite y datos tomados en campo. El criterio de clasificación empleado se basa en el análisis de la relación entre la evolución del NDVI y del  $K_c$ , que sirve para definir una leyenda temática de la clasificación que abarca grupos de cultivos con una evolución fenológica comparable, compuesta por: cereales y leguminosas en regadío, cultivos no estacionales en regadío, regadíos de verano de ciclo corto, regadíos de verano de ciclo largo, vid, cultivos de secano, barbechos y suelos desnudos. El método de detección propuesto se basa en una clasificación supervisada resuelta mediante el algoritmo de distancia de Mahalanobis, que se completa con un clasificador en árbol para las zonas no asignadas que permite al mismo tiempo depurar errores de la clasificación anterior. Por último, se aplica un clasificador de contexto sobre los resultados parciales para intentar eliminar problemas de borde y dotar de mayor continuidad a los mapas.

En relación a la detección de cultivos herbáceos en regadío aparecen otros trabajos paralelos, como el reconocimiento de aprovechamientos en regadío con aguas subterráneas (Montesinos *et al*, 1999), centrado en el análisis del potencial de la teledetección para su uso como documento de apoyo en procesos administrativos de resolución de expedientes de concesión de derechos de uso de aguas subterráneas e

incluso como prueba en procedimientos judiciales, y como el seguimiento del control de los Regímenes de Explotación de los acuíferos de La Mancha Occidental y Campo de Montiel (Montesinos *et al*, 2002); (Bea *et al*, 2003), donde se analiza el potencial de la teledetección para la localización de explotaciones que infrinjan las limitaciones impuestas anualmente sobre las extracciones de agua en los acuíferos sobreexplotados.

Los trabajos referidos al viñedo tampoco son abundantes, y se encuentran dirigidos al cartografiado del viñedo (Lanjeri *et al*, 2001; Rubio *et al*, 2001) pero no a la segmentación entre viñas en secano y regadío.

Dentro del V Programa Marco, encontramos el proyecto BACCHUS (*Methodological approach for vineyard inventory and management*), donde se eligió como una de las áreas piloto, una zona en Villarrobledo (Albacete). En este proyecto existe un módulo orientado a la optimización de prácticas de gestión del viñedo a partir de datos espaciales, entre las que se aborda el riego. Sin embargo, dentro de la región manchega no se llegó a implementar esta aplicación, centrándose los esfuerzos en la identificación de parcelas de viñedo (Quintanilla *et al*, 2005).

### **2.2.3. Análisis territorial basado en la integración de información geográfica**

Los apartados anteriores han servido para analizar las posibilidades de las técnicas de Observación de la Tierra para la determinación de la distribución de cultivos regados. La teledetección se comporta como una fuente de datos de gran potencia para la cuantificación de superficies en regadío, especialmente gracias a la disponibilidad de plataformas de observación que permiten la adquisición de datos con resolución (espectral, espacial, temporal y radiométrica) suficiente, y al desarrollo de metodologías operativas de proceso digital de imagen válidas para este fin.

No obstante, la teledetección presenta limitaciones inherentes a su empleo, por lo que debe ser vista como una técnica que proporciona una aproximación al conocimiento de las características de un territorio y que se encuentra asociada a un grado de fiabilidad.

La información derivada del proceso digital de imagen puede ser complementada con otros datos geográficos con objeto de mejorar la calidad de los resultados. La integración de datos a partir de técnicas de análisis espacial proporciona un enfoque de mayor amplitud y de comprobada utilidad, que es reflejado en manuales de referencia (Richards, 1993). Muchos datos relacionados con la existencia de riego en una parcela pueden ser ligados a una referencia espacial, lo cual permite su integración en el marco de un Sistema de Información Geográfica (SIG). En muchas ocasiones, los datos de interés corresponden a elementos no-numéricos que guardan relación con la descripción de las características de un territorio, de las parcelas agrícolas, o de información relacionada con prácticas de gestión. Este tipo de datos engloba mapas geológicos, de tipos de suelo, de hidrología o de accesibilidad, así como inventarios relacionados con medidas de gestión hídrica o mapas ligados a políticas de planificación.

El empleo de datos geográficos como apoyo en el proceso de clasificación de parcelas agrícolas presenta dos dificultades principales que resulta necesario abordar: la transformación de los datos de tipo descriptivo en variables de tipo numérico y la optimización del proceso de combinación de los diferentes datos disponibles. Ambos aspectos pueden ser abordados a partir de procesos de evaluación multicriterio (EMC), que pueden ser empleados como una herramienta de análisis espacial diseñada para la ponderación óptima de diferentes datos dentro de un proceso de asignación o de toma de decisiones (Gómez y Barredo, 2005).

El análisis multicriterio es una herramienta de uso cada vez más extendido dentro del campo de la geografía que permite una amplia **comunicación con el territorio** (Rodríguez Esteban, 2003). El empleo de este tipo de procesos ha demostrado amplias posibilidades en aplicaciones ligadas al análisis regional y la planificación de políticas territoriales y de gestión de recursos.

Los trabajos realizados en los últimos años y basados en la aplicación de técnicas de evaluación multicriterio abordan una temática muy diversa, como el modelado de capacidad de acogida o de localización de emplazamientos óptimos (Bosque *et al*, 1999), la predicción de cambios en usos del suelo o el análisis de probabilidad de ocurrencia de sucesos (Paagelow *et al*, 2003; Aguilera, 2006), la selección de alternativas en la planificación (Martín-Ortega y Berbel, 2007) o la optimización del beneficio asociado a la toma de decisiones sobre el empleo de recursos (Gómez-Limón *et al*, 2003).

En el terreno de la agronomía este tipo de aplicaciones abarcan desde la evaluación de las zonas más aptas para la explotación de recursos hídricos subterráneos o el análisis de diferentes escenarios para la reducción del consumo de agua (Goncalves *et al*, 2007), hasta la definición de zonas idóneas para la siembra de determinados cultivos (Ceballos y López-Blanco, 2003) o de estrategias relacionadas con la expansión o retirada del riego a nivel regional (Chen *et al*, 2008).

Sin embargo, en la bibliografía no encontramos referencias en la que se empleen técnicas de EMC para la decisión acerca de la existencia de riego, ni en las que se integren estas técnicas en procesos de obtención de información basados en el empleo de datos de Observación de la Tierra. La relación entre ambas aproximaciones suele limitarse al empleo de la teledetección como un dato de apoyo para la obtención de mapas que se integran dentro de un proceso general de evaluación multicriterio.

### **2.3. Estimaciones de superficie regada dentro de la Cuenca Alta del Guadiana**

La presente investigación no resulta la primera aproximación realizada hacia la determinación de la superficie regada en la Cuenca Alta del Guadiana. La declaración de sobreexplotación de los acuíferos de La Mancha Occidental y del Campo de Montiel ha motivado que hayan sido diversos los esfuerzos realizados para mejorar el conocimiento acerca de la extensión de la superficie regada cada año. La determinación de los tipos de cultivos en regadío existentes posibilita, además, que se puedan estimar las extracciones de forma indirecta, a partir de las dotaciones anuales estimadas para cada cultivo.

Los primeros datos disponibles se basan en estadísticas tomadas por parte del personal de las Cámaras Agrarias. Así, para el periodo 1981-1990, el Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) realizó varios estudios para estimar las superficies regadas dentro de ambos sistemas acuíferos (SGOP, 1991). La metodología se basa en la recogida de datos provenientes de las encuestas facilitadas por las Cámaras Agrarias provinciales que son contrastados en algunas Cámaras Agrarias locales. Para el caso de la viña, se aplica un coeficiente sobre el total de la superficie aproximada, de forma que la superficie de viña regada para cada año se estima, tentativamente, entre un 5 y un 10% del total de viñedo. Estos datos no llevan asociados ningún tipo de representación espacial.

Desde el año 1991, la Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHG) ha venido realizando el control del cumplimiento de los regímenes anuales de explotación de los acuíferos de La Mancha Occidental y del Campo de Montiel. Durante los primeros años (periodo 1991-1995) se empleó fotografía aérea en color para la determinación de las superficies regadas. Esta metodología se basaba en la identificación directa de las superficies regadas sobre fotografía aérea tomada en vuelos realizados durante el verano de cada año y completados con visitas de campo posteriores, que se llevaban a cabo una vez las fotografías estaban disponibles. Las dificultades operativas, las limitaciones inherentes al empleo de una única fecha, el precio de ejecución de un vuelo anual sobre una superficie tan extensa, la imposibilidad de automatización del proceso y los plazos de entrega (primavera del año siguiente) motivaron la necesidad de introducir mejoras en el proceso de obtención de información.

En el año 1997, y en este contexto, la CHG participó como usuario final en el proyecto ASTIMwR, perteneciente al apartado de medio ambiente y clima del IV Programa Marco de I+D de la Unión Europea. Como hemos visto, este proyecto exploró las posibilidades de empleo de las técnicas de Observación de la Tierra para cubrir diferentes necesidades de información de gestores de agua, eligiéndose la cuenca del Guadiana como zona piloto. Entre los requisitos de usuario recopilados, la cuantificación de superficies regadas se consideró prioritaria y las técnicas de teledetección se identificaron como una herramienta capaz de proporcionar la información necesaria.

Desde la finalización de este proyecto, la elaboración de mapas de cultivos en regadío se ha basado en el proceso digital de imágenes multiespectrales.

En la Cuenca Alta del Guadiana, se han realizado diferentes estudios de teledetección con objeto de obtener una cifra ajustada de la estimación del área regada. Sin embargo, las técnicas empleadas basadas en el proceso de imágenes de satélite han sido, en muchos casos, incapaces de identificar con fiabilidad ciertos cultivos (principalmente viña) y, en consecuencia, sus resultados han sido considerados incompletos (Llamas y Martínez-Santos, 2005). Además, las necesidades hídricas de los cultivos varían considerablemente de un año a otro dependiendo de las precipitaciones, lo cual dificulta la obtención de resultados fiables en cultivos donde las dotaciones de riego pueden ser muy variables, como es el caso de los cereales de invierno. Los cambios en la cultura agrícola de la zona, donde en los últimos 10 años, el riego en el viñedo ha tenido un crecimiento elevado y las prácticas de riego de apoyo se han generalizado, justifican la necesidad de introducir mejoras en los procesos metodológicos desarrollados con objeto de aumentar la fiabilidad de la información obtenida.

El objetivo del presente apartado se centra en la recopilación de los datos obtenidos en los diferentes estudios realizados para la cuantificación de la superficie regada dentro de los acuíferos sobreexplotados en la Cuenca Alta del Guadiana (ver Tabla 1), haciendo referencia a los principales tipos de cultivos existentes. En este sentido, aunque se recogen datos históricos de 1990 (coincidente con la época de máximas extracciones) y de 1995 (momento de máxima afección de la sequía), se pone especial énfasis en los datos disponibles para los últimos años, con objeto de:

- revisar los datos empleados para la puesta en marcha de los programas en vigor para la gestión hídrica de la zona, principalmente representados por el Plan Especial del Alto Guadiana (ver Apéndice A.3.5).
- disponer de datos válidos para someter a contradicción los resultados del presente trabajo de investigación.
- estudiar la variación obtenida en los resultados en función de la metodología empleada.

Las diferencias en las cifras ilustran tanto el dinamismo del territorio, como la dificultad del proceso de discriminación de superficies regadas. Queda clara la existencia de incertidumbres en un dato clave, tanto para una correcta planificación de los recursos hídricos, como para la toma y supervisión de medidas de control.

En este sentido, resulta especialmente problemático el hecho de que las cifras facilitadas no se encuentren asociadas a intervalos de confianza obtenidos a partir de procesos de validación rigurosos, que el origen de los datos no quede convenientemente explicado o que los datos no se refieran a un mismo concepto.

Tabla 1. Recopilación de datos de estimación de superficies regadas en los acuíferos sobreexplotados

Estudio	Cereales	Leguminosas	Ajo	Total herbáceos primavera	Hortícolas	Maíz	Industriales	Otros herbáceos verano	Total herbáceos verano	Forrajes	Total herbáceos	Víña	Otros leñosos	Total leñosos	Superficie total
1990	34.523	1.066		35.589	18.259	16.009	6.129	1.901	42.298	13.543	91.430	25.911	681	26.592	118.022
1995	33.642	4.205	970	38.817	8.158	190	5.432	574	14.354	1.067	54.238	49.058	285	49.343	103.581
2004	12.356		2.824	15.180	6.359	5.400	2.101	2.000	17.758	919	33.857				
2005a	25.264		2.617	27.881	11.080	3.224	2.093	807	17.204	755	45.840	52.492		52.492	98.332
2005b	26.033		2.727	28.760	13.337	3.308	2.155	828	19.628	757	49.145	84.019		84.019	133.165
2005c	25.389		1.559	26.948	12.687	3.852	2.839	796	20.174	756	47.878	83.640		83.640	131.518
2005d											150.103			51.369	201.472
2006	26.847	38	1.406	28.291	11.744	1.138	36	3.521	16.439	1.359	46.089	74.359		74.359	120.448
2007	17.991		1.266	19.257	13.673	1.734	427	1.000	16.834	1.062	37.153	93.888		93.888	131.041



Las fuentes consultadas para la recopilación de los datos han sido las siguientes:

- 1990: “Estudio de las extracciones y niveles piezométricos en los acuíferos de la llanura Manchega” (SGOP, 1991). Datos estimados por el Servicio Geológico, a partir de censos agrarios.
- 1995: “Control de urgencia del Régimen de Explotación del recurso hidráulico de los acuíferos de La Mancha Occidental y del Campo de Montiel” (CHG, 1995). Datos estimados por la CHG a partir del análisis de fotografía aérea y ajustados con información de apoyo tomada en campo, entrevistas con agricultores y censos agrarios.
- 2004. Estudios para el seguimiento del control del régimen de explotación en La Mancha Occidental y Campo de Montiel elaborados por la Comisaría de Aguas de la CHG. Análisis realizado mediante teledetección, centrado únicamente en cultivos herbáceos.
- 2005a y 2006: Estudio para la estimación de superficies en regadío por teledetección en la cuenca del Alto Guadiana y acuíferos sobreexplotados en las campañas 2005 y 2006, realizado por la empresa pública Tragsatec.
- 2005b: Datos extraídos de la memoria técnica del PEAG, concretamente en la tabla 4.35 del capítulo II, “situación actual socioeconómica y ambiental”. La fuente es un estudio de teledetección realizado a partir de imágenes de satélite de 2005, complementado con datos de campo.
- 2005c: Datos extraídos de la tabla 1 del anejo I del PEAG, “definición de escenarios de uso del agua en la agricultura del acuífero 23”. Los datos se refieren exclusivamente al acuífero de La Mancha Occidental, y se basan en el estudio de teledetección realizado por la CHG para 2005, completado con datos de declaraciones para la PAC recogidos en hojas 1T.
- 2005d: Datos extraídos del documento del PEAG que describe el “Programa de modernización y desarrollo agrario” (en su anejo de análisis de resultados). Han sido obtenidos a partir del Catastro de Rústica y de datos complementarios aportados por la Consejería de Agricultura de Castilla-La Mancha. Estas cifras deben relacionarse realmente con la superficie regable dentro de los acuíferos sobreexplotados y no con la superficie regada durante una campaña agrícola. Los datos de viña regada se han tomado del Registro Vitícola de Castilla-La Mancha.
- 2007: Estudio “Delimitación de superficies realmente regadas en Campo de Montiel y Mancha Occidental en el año 2007”, elaborado por la Comisaría de Aguas de la CHG. También se emplea la teledetección como base para la obtención de datos de superficie regada durante el periodo de referencia.

El mosaico de cifras sirve para evaluar la dificultad del empleo de las técnicas de teledetección en un contexto operativo.

Los datos de riego en cereal son muy variables, si bien hay que considerar la incidencia de la climatología, dado que este cultivo se riega en mayor medida dependiendo de las precipitaciones acaecidas durante la primavera. Así, en 2004, la cifra de cereal regado es muy baja debido a que ese año se produjo una primavera excepcionalmente húmeda. La influencia de la distribución temporal e intensidad de las precipitaciones y la diferenciación de riegos con distinto grado de dotación parece que son factores en los que resulta conveniente profundizar.

Los datos para los cultivos herbáceos de verano son mucho más homogéneos. Gracias al fuerte contraste existente entre los cultivos regados y las restantes parcelas agrícolas, su discriminación a partir de técnicas de teledetección es muy fiable. La aplicación de metodologías sencillas basadas en clasificación multiespectral supervisada y el uso de máscaras de vegetación natural permite la obtención de mapas de cultivos herbáceos de alta dotación con fiabilidades globales mayores del 85% (UE, 1999).

Por último, el caso de la viña es el más complicado. Dentro del PEAG (en Memoria técnica; II Situación actual socioeconómica y ambiental; 3.- Análisis situación actual agronómica) se remarca esta situación. Los diferentes datos disponibles son muy dispares: catastro (10.932 ha), declaraciones para la PAC de 2006 (3.744 ha) y superficie incluida en el Registro Vitícola a fecha de 2006 (59.745 ha). Los datos inferidos a partir de teledetección proporcionan estimaciones a su vez diferentes de las restantes fuentes de datos, con una elevada variabilidad entre sí. El estudio de teledetección de 2005 cuantifica la superficie de viñedo en regadío en 52.500 ha, mientras que usando la misma técnica, el dato para 2006 asciende a 74.350 y en 2007 se sitúa en 94.000 ha.

La viña ha sido cultivada tradicionalmente en secano en la zona, existiendo además, una prohibición para su riego vigente hasta el año 1995. Sin embargo, la posterior puesta en marcha de sucesivos Planes de reconversión del viñedo desde el año 2000, ha impulsado un crecimiento progresivo de la superficie de viña en regadío. Dentro de este escenario, se estima que el riego del viñedo ha sufrido una tendencia creciente en los últimos años. Sin embargo, este aumento del riego no ha podido producirse a los ritmos que indican las cifras incluidas en la Tabla 1, por lo que estos datos parece que incurren en contradicción entre sí y deben ponerse en duda.

Dentro del análisis comparativo de cifras, llama la atención la diferencia existente entre la cifra obtenida para 2005, en el estudio de cuantificación a partir del tratamiento de imágenes de satélite (2005a) y las cifras recogidas en el PEAG, (2005b y 2005c) que en principio, se basan en el mencionado estudio. En el texto del PEAG no se encuentra la explicación de esta diferencia ni se detalla el posible criterio utilizado para justificar el aumento en la estimación de superficie.

El dato de superficie regable para 2006, derivado de datos de Catastro, se incluye con objeto de ilustrar la consecuencia del empleo indistinto de los términos que designan conceptos ligados al regadío. Se aprecia como un dato que hace referencia a superficie regable no resulta comparable con estimaciones de superficie regada.

Una explicación más detallada acerca de las diferencias metodológicas que han propiciado la variabilidad en las cifras de superficie regada se encuentra en (Bea *et al*, 2010). Las conclusiones alcanzadas en este artículo inciden en que la teledetección es una fuente de datos adecuada aunque el proceso de extracción de información resulta complejo y dependiente de la metodología empleada. Para los cultivos herbáceos de verano, las metodologías estándar funcionan de forma aceptable, pero no sucede lo mismo para los casos de la viña y cereal en regadío. La aplicación de metodologías genéricas se muestra insuficiente y lleva a la obtención de datos contradictorios ante la falta de un control de calidad riguroso.

El auge del riego en estos tipos de cultivos y la incertidumbre asociada a la cuantificación de superficies regadas justifica una mayor profundización en las metodologías orientadas al uso de técnicas de información geográfica para la discriminación de cultivos regados.



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO Y RECOPIACIÓN DE DATOS

El desarrollo metodológico que se lleva a cabo en esta Tesis doctoral, se dirige al uso de técnicas de información geográfica para la obtención de información, en forma de mapas de la distribución de cultivos regados, habiéndose elegido como zona de estudio los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana. El esquema de metodológico se ha dividido en tres partes (ver Figura 3), centradas en

- i) el **diseño** y adquisición de datos,
- ii) el propio **desarrollo metodológico** para la obtención de información temática y
- iii) el **análisis y validación de resultados**.

Como primer paso de la **fase de diseño**, se ha llevado a cabo una segmentación basada en la tipología de los principales cultivos presentes en los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana. Así, teniendo en cuenta las características en cuanto a fenología, extensión y consumo estimado de los cultivos en el ámbito de trabajo, se han definido metodologías diferentes para distintos grupos de cultivos.

La adquisición de datos se ha ajustado a la segmentación de cultivos previa, de forma que los datos de partida proporcionen información temporal, espacial, espectral y temática suficiente para la elaboración de un mapa de cultivos regados dentro del conjunto de la zona de estudio. Con este fin se va a llevar a cabo el proceso digital e integración de diferentes datos de Observación de la Tierra, y de otros datos de apoyo que comprenden observaciones específicas realizadas en campo, información relacionada con las características de las parcelas o de tipo administrativo, inventarios y análisis de cambios acaecidos en los últimos años. Todos los datos adquiridos tienen relación con criterios asociados a la probabilidad de presencia de riego.

Teniendo en consideración todos estos criterios, se pretende desarrollar una aproximación metodológica integral que se ajuste a las características del territorio. Además, la metodología se aplica de forma separada en cada una de las unidades definidas a partir de procesos de segmentación territorial, específicos para cada tipología de cultivo.

El **desarrollo metodológico** se basa en la integración de datos territoriales en un contexto multicriterio y usando los datos de campo como referencia, lo que permite la extracción de información temática relacionada con la existencia de riego en parcelas ocupadas por los diferentes grupos de cultivos presentes en la zona.

En este capítulo se describe la primera fase metodológica (diseño y adquisición de datos), mientras que el desarrollo metodológico y el análisis de resultados se tratan en los capítulos 4 y 5, respectivamente.

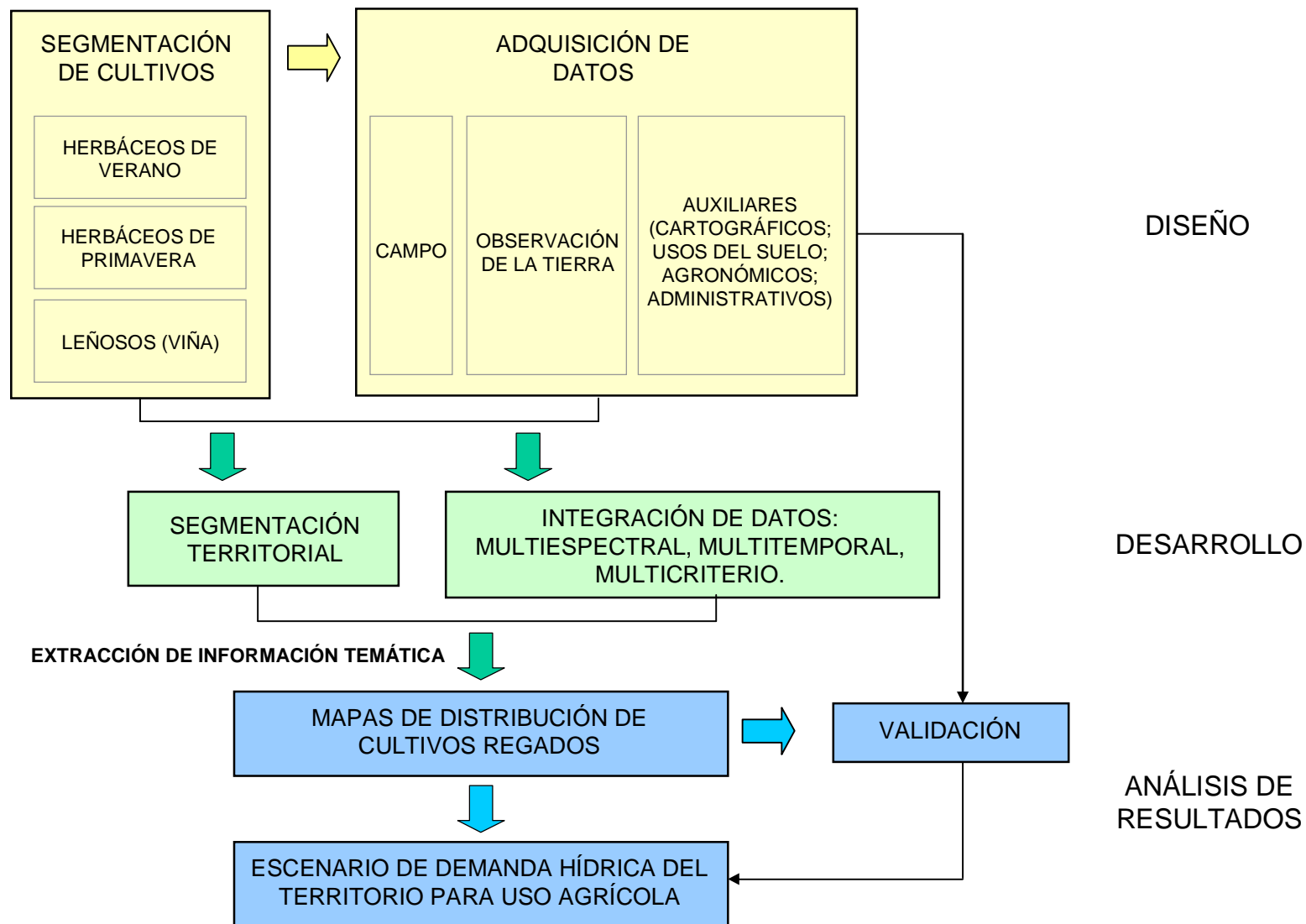


Figura 3. Esquema general de la metodología propuesta

La metodología que se presenta ha sido puesta en práctica de forma íntegra durante los años 2008 y 2009, si bien se apoya en varias experiencias llevadas a cabo sobre la misma hipótesis de trabajo desde el año 2004. En el primero de los años (2008) se ha trabajado solo en el caso del viñedo, diseñándose la aproximación metodológica y efectuando un primer ensayo. Posteriormente, en 2009, se ha implementado la metodología para los cultivos herbáceos, y además, la metodología para el viñedo ha sido ajustada y depurada. De esta forma, durante este último año, el conjunto de la metodología propuesta ha sido aplicado en un contexto operativo, por lo que el proceso de **validación y análisis de resultados** se refiere a esta campaña agrícola.

### 3.1. Segmentación de cultivos en regadío

El primer factor que resulta necesario definir para el diseño de la metodología de trabajo en la zona de estudio es la leyenda temática del mapa final de cultivos en regadío que va a ser elaborado. Esta leyenda debe contener un conjunto de elementos que engloben, en función de criterios coherentes, a los diferentes tipos de cultivos que aparecen en regadío dentro de la zona de estudio, y su construcción debe partir del conocimiento de los cultivos regados a lo largo del año dentro de los acuíferos sobreexplotados.

Existen diversos trabajos y fuentes de datos que proporcionan información acerca de los cultivos en regadío presentes en la Llanura Manchega, dando en algunos casos indicaciones acerca de la abundancia relativa de cada uno de ellos:

- *Planes de ordenación de las extracciones* de los acuíferos de La Mancha Occidental y del Campo de Montiel. Dentro de las medidas asociadas al control de los regímenes anuales de explotación que imponen ambos Planes, se adjuntan tablas de dotaciones asociadas a los cultivos en regadío que pueden encontrarse dentro de los límites de los perímetros de sobreexplotación. Los cultivos considerados (ordenados alfabéticamente) son ajo, alfalfa, berenjena, cebolla, cereal, colza, girasol, guisantes, lentejas, maíz, maíz forrajero, melón, patata, pimiento, remolacha, soja, sorgo, tomate, veza forrajera y vid, así como tres categorías genéricas que comprenden a otros cultivos hortícolas, otros cultivos industriales y frutales.

En el régimen de explotación de 2009 para el acuífero de La Mancha Occidental, además de hacer referencia a la tabla general de dotaciones, se recogen los periodos aproximados de riego de los cultivos de la zona. En este listado desaparece el sorgo, y se incluye adormidera, brócoli, espinaca, garbanzos, judía verde, olivo, plantas forrajeras y sandía.

- Sistema de Información para el Asesoramiento del Riego (*SIAR*) de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (JCCM). A través de esta herramienta, se

facilitan a los agricultores datos semanales para que ajusten sus dotaciones de riego a las necesidades teóricas de los cultivos. Estas recomendaciones se sustentan en las mediciones de una red de estaciones meteorológicas con una distribución amplia dentro de la Llanura Manchega. La lista de cultivos sobre los que el SIAR facilita recomendaciones de riego se relaciona con su abundancia en las diferentes áreas geográficas en que se produce el asesoramiento.

Tabla 2. Cultivos cubiertos por las recomendaciones del SIAR, en la zona de estudio, durante 2009

PROVINCIA	ZONA	CULTIVOS CON RECOMENDACIÓN SEMANAL DE RIEGO
ALBACETE	Campo de Montiel	Cebada, Cebolla, Guisante, Trigo y Vid
CIUDAD REAL	Alcázar de San Juan, Argamasilla y Tomelloso	Alfalfa, Cebada, Colza, Melón, Olivo, Pimiento, Sandía, Trigo y Vid
	Daimiel	Cebada, Cebolla, Maíz, Melón, Patata, Pimiento, Sandía, Trigo y Vid
	Manzanares	Ajo, Cebada, Cebolla, Maíz, Melón, Patata, Pimiento, Sandía, Trigo y Vid
CUENCA	Casas de Fernando Alonso y San Clemente	Alfalfa, Ajo, Cebada, Cebolla, Girasol, Maíz, Patata, Tomate, Trigo y Vid
	El Pedernoso	Ajo, Cebada, Cebolla, Melón, Patata, Tomate, Pimiento, Trigo y Vid

- Plan Especial del Alto Guadiana (PEAG). En este documento se realiza un análisis de la distribución de superficies regadas en los años 2005 y 2006. Dentro de este trabajo, se efectuaron varias campañas de campo, considerándose los siguientes cultivos como significativos en cuanto a su extensión dentro de los acuíferos objeto de estudio: ajo, alfalfa, cebolla, cereal, huerta, maíz, melón, patata, pimiento, remolacha, tomate y vid.
- Encuesta de superficies y rendimientos de cultivos en España (ESYRCE), realizada por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). Este trabajo se realiza anualmente para el conjunto del territorio nacional y consiste en la elaboración de estadísticas agrarias a partir de la técnica del marco de muestreo. Para ello, se realiza un muestreo exhaustivo de los cultivos presentes en cuadrados de 49 hectáreas dentro de unidades de una malla regular. Los datos recogidos se extrapolan al conjunto del territorio mediante un proceso estadístico de expansión directa ajustado a partir de una estratificación territorial. Los resultados de este estudio, generados en el ámbito de Comunidad Autónoma, nos sirven para evaluar la presencia y abundancia potencial de los diferentes tipos de cultivos regados. Dentro de Castilla-La Mancha, los cultivos donde se han estimado superficies significativas regadas durante 2008 y 2009 han sido (ordenados según tipo): avena, cebada, maíz y trigo, (cereales); guisantes (leguminosas); patata (tubérculos); colza, girasol (industriales); alfalfa,



praderas (forrajeras); ajo, cebolla, espárrago, lechuga, melón, pimiento, (hortalizas); olivo y vid (leñosos).

- Declaraciones para la PAC, recogidas dentro de las *hojas 1T*. Según los datos recogidos en los últimos años por la Consejería de Agricultura de la JCCM, los cultivos regados más representativos en la provincia de Ciudad Real son avena, cebada y trigo, (cereales de invierno); guisantes y veza (leguminosas); patata (tubérculos); girasol (industriales); alfalfa, (forrajeras); ajo, cebolla, melón, sandía, pimiento y tomate (hortalizas); olivo y vid (leñosos).

Tabla 3. Descripción de la leyenda temática del mapa de cultivos en regadío

GRUPO DE CULTIVOS	CULTIVOS REGADOS	CULTIVOS INCLUIDOS
Cereales	Cereal de invierno	Cereales sembrados en invierno y regados principalmente durante la primavera. El cereal de invierno más abundante es la <i>cebada</i> , seguida por el <i>trigo</i> , y en menor medida, la <i>avena</i> .
	Maíz	No se hace distinción entre <i>maíz</i> y <i>maíz forrajero</i> , dado que éste último no resulta representativo.
Forrajeras	Alfalfa	<i>Alfalfa</i> y <i>praderas</i> que reciben riego durante primavera y verano.
Hortalizas	Ajo	<i>Ajo</i> y <i>cebolla temprana</i> , (recogida en la misma época que el ajo).
	Cebolla	<i>Cebolla</i> .
	Hortalizas de hoja	Hortalizas de temporada: <i>brócoli</i> , <i>col</i> , <i>espinaca</i> , <i>lechuga</i> ...
	Melón o Sandía	<i>Melón</i> y <i>Sandía</i> . No se hace distinción entre ambos cultivos.
	Pimiento o Tomate	<i>Pimiento</i> y <i>Tomate</i> , además de otras cucurbitáceas, (como <i>calabacín</i> o <i>berenjena</i> ...).
Industriales	Adormidera	<i>Adormidera</i> .
	Girasol	<i>Girasol</i> en regadío.
	Remolacha	<i>Remolacha</i> .
Leguminosas	Leguminosas para forraje	<i>Guisante</i> y otras leguminosas.
Tubérculos	Patata	<i>Patata</i> en diferentes ciclos de cultivo.
Otros herbáceos	Otros herbáceos (primavera)	Otros cultivos herbáceos regados únicamente durante la <i>primavera</i> .
	Otros herbáceos (verano)	Otros cultivos herbáceos regados únicamente durante el <i>verano</i> .
	Otros herbáceos (otoño)	Otros cultivos herbáceos regados únicamente durante el <i>otoño</i> .
Leñosos	Vid	<i>Viñedo</i> .
	Otros leñosos	<i>Olivo</i> , y en menor medida, <i>almendro</i> y <i>frutales</i> .

La definición final de la leyenda del mapa de cultivos regados (ver Tabla 3) se ha llevado a cabo considerando este conjunto de datos, además de las observaciones realizadas durante las campañas de campo de 2008 y 2009 (ver apartado 3.2.). Algunas de las categorías contempladas incluyen varios tipos de cultivos, para lo cual se ha tenido en cuenta que presenten un ciclo de desarrollo fenológico similar y dotaciones estimadas de consumo de un mismo orden de magnitud.

Con carácter complementario a la definición de la leyenda temática de cultivos, es necesario conocer los periodos del año en que se produce el riego, así como analizar la evolución fenológica de cada uno de los cultivos. Ambos factores resultan determinantes a la hora de diseñar una metodología operativa para su discriminación, habiendo sido caracterizados (ver Tabla 4) en base a datos recopilados en otros documentos de trabajo (MAPA, 1982; CHG, 2007), y a las observaciones de las campañas de campo. Además, otros factores propios de cada cultivo como el porte (leñoso o herbáceo) y la existencia de prácticas agrícolas características también deben ser tenidos en cuenta.

Por último, debe considerarse la abundancia relativa de cada grupo de cultivos, ya que la identificación de los cultivos más representativos debe primar sobre la discriminación de cultivos con poca superficie dentro de la zona estudiada. De esta forma, se han definido tres grandes grupos de cultivos, con diferencias en fenología y fenotipo<sup>3</sup>:

- Cultivos herbáceos regados durante la primavera, donde se distinguen dos categorías: los cereales de invierno (que representan la mayor parte de la superficie) y otros cultivos regados durante la primavera. En esta segunda categoría se engloban el ajo, la adormidera y las leguminosas para forraje, además de otro grupo genérico (*otros herbáceos regados en primavera*).
- Cultivos herbáceos regados durante el verano. En este grupo se consideran varios tipos de cultivos regados principalmente durante esta estación, y que debido a las características climáticas de la zona necesitan la existencia de riego para desarrollarse durante el periodo de estiaje. Se incluyen alfalfa, cebolla, hortalizas de hoja, girasol, maíz, melón o sandía, pimiento o tomate, patata, remolacha, y una categoría genérica para otros cultivos regados durante el verano. Dentro de este grupo también se engloban los cultivos herbáceos regados durante el otoño, dado que se detectan siguiendo una metodología análoga a la empleada para los riegos de herbáceos de verano.
- Cultivos leñosos, donde destaca el viñedo, definiéndose además la categoría de "*otros leñosos*" que contiene otros cultivos arbóreos.

---

<sup>3</sup> Dentro de la etiqueta de cultivos herbáceos se consideran todos aquellos que no tienen un porte leñoso, considerándose familias diversas como gramíneas, hortalizas, hierbas, bulbos o tubérculos.

Tabla 4. Calendario fenológico de los principales cultivos en regadío dentro de la zona de estudio

CULTIVO	MES											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Cereal												
Adormidera												
Ajo												
Leguminosas												
Otros (primavera)												
Alfalfa												
Cebolla												
Girasol												
Hortalizas de hoja												
Maíz												
Melón / Sandía												
Pimiento / Tomate												
Patata												
Remolacha												
Otros (verano)												
Otros (otoño)												
Vid												
Otros leñosos												

Periodo de siembra	
Periodo de riego	
Periodo de recogida	

Nota: Para algunos cultivos (como el melón, la sandía o la patata) que son sembrados y recogidos con fechas variables según la estrategia de cada agricultor, se han considerado los periodos más habituales de acuerdo con las observaciones realizadas durante las visitas de campo.

## 3.2. Campañas de campo

La obtención de datos relacionados con las características, distribución y tipología de los cultivos supone la base para el establecimiento de relaciones robustas entre la información registrada en las imágenes de satélite (o en otras fuentes de datos geográficos) y la realidad de un territorio (Gallego, 2004).

Todos los procesos de análisis para la obtención de información temática y de control de calidad de los resultados obtenidos, que se desarrollan en el presente trabajo de investigación, se basan en datos recogidos durante campañas de campo específicas.

Estas campañas han sido llevadas a cabo durante el verano del año 2008, para el viñedo, y durante la primavera y verano del año 2009, para todos los cultivos.

### 3.2.1. Diseño de las campañas de campo

El diseño general del proceso de toma de datos en campo ha tratado de responder, de forma justificada, a una serie de preguntas:

- ¿Cuáles son los cultivos que deben muestrearse?
- ¿Cuándo debe realizarse la toma de datos?
- ¿Qué método de muestreo resulta conveniente aplicar?, que a su vez se relaciona directamente con la cuestión de ¿Dónde habría que realizar los muestreos?
- ¿Cuánta superficie resulta necesario muestrear para cada tipo de cultivo?
- ¿Cuáles son los datos que deben registrarse para cada parcela y tipo de cultivo y cómo van a tomarse estos datos?

En relación a la primera pregunta, la lista de cultivos a muestrear debe incluir a todos aquellos que, a priori, presenten una extensión significativa dentro del área de estudio. El análisis desarrollado dentro del apartado 3.1, ha permitido identificar los cultivos en regadío predominantes, aquellos con una superficie importante, así como otros con presencia en la zona. Además, la información recopilada aporta indicaciones de abundancia relativa de algunos cultivos en áreas determinadas dentro de los acuíferos sobreexplotados. Todos los cultivos con presencia en la zona de estudio (ver Tabla 3) deben ser muestreados de forma representativa, ya que en caso contrario, serán clasificados erróneamente o no se verán incluidos en la clasificación final. También cabe la posibilidad de que sean incluidos en las categorías genéricas de “Otros”, aunque en este caso, toda la superficie incluida en este grupo se considerará como un defecto en el proceso de clasificación, por lo que se debe tratar de minimizar la superficie no asignada a ninguna categoría concreta.

Acerca de cuándo deben realizarse las campañas, el análisis de los cultivos regados en la zona de estudio proporciona una primera aproximación al recoger tres grandes grupos de cultivos en función de su tipología y fenología: cultivos herbáceos regados durante la primavera, cultivos herbáceos regados durante el verano y cultivos leñosos.

La planificación de las campañas de campo debe basarse en la fenología de los cultivos de la zona, que a su vez ha de ser considerada como el factor principal para la selección de las fechas de adquisición de las imágenes de satélite. De esta forma, se podrá asegurar que los datos recogidos en campo sean sincrónicos con las fechas de adquisición de las imágenes de satélite lo que permitirá poner en relación los valores digitales de reflectividad de las imágenes con las características de los cultivos regados en la zona.

Las diferencias entre los cultivos presentes en los tres grupos definidos aconseja el diseño de campañas de muestreo específicas para cada uno de ellos. La respuesta a las restantes cuestiones concernientes al diseño, varía para cada una de las campañas dirigidas a cada grupo de cultivos, por lo que serán contestadas de forma independiente.

#### ***i) Campaña de primavera***

El objetivo de la campaña de primavera es la obtención de datos relacionados con los cultivos regados únicamente durante esta estación. Atendiendo a la leyenda temática de cultivos, las clases a muestrear son el cereal de invierno junto a otros cultivos con mucha menor extensión como el ajo, las leguminosas y la adormidera.

La elevada representatividad del cereal dentro de la zona de estudio ha obligado a que el diseño de la campaña de primavera esté orientado, principalmente, a la caracterización de la distribución e intensidad del riego en cultivos de cereales.

Se sabe que el riego en el cereal se produce con dotaciones que oscilan notablemente, existiendo un gradiente que varía entre riegos intensivos, regularmente repartidos durante la campaña, hasta los llamados de emergencia, que consisten en una o dos aplicaciones en caso de que se quiera asegurar la cosecha ante una situación climática adversa. Entre ambos, encontramos casos en los que se producen riegos de intensidad diferente.

Con objeto de observar tanto la existencia de riego como el efecto que éste produce sobre el cultivo, se ha dividido la campaña de primavera en tres visitas que se han realizado sobre un conjunto definido de parcelas. Estas tres visitas se han realizado de forma secuencial a lo largo de abril, mayo y junio del año 2009, tomando medidas en cada uno de estos meses sobre la misma serie de parcelas.

A lo largo de este conjunto de visitas ha sido posible obtener datos acerca de la presencia y estado fenológico de otros cultivos regados durante la primavera.

El método de muestreo elegido ha sido de tipo *opinático* (dirigido) y ha consistido en itinerarios dentro de zonas donde se conoce la existencia de explotaciones en regadío.

La elección de este tipo de muestreo se debe a la necesidad de obtener *verdad terreno*, de cereal y otros cultivos en regadío, en un área de gran tamaño donde concurren diversas situaciones ambientales, y en la que aparecen diferencias agronómicas significativas entre zonas alejadas.

Por este motivo, los itinerarios de muestreo se han llevado a cabo dentro de zonas definidas a partir de un proceso de segmentación territorial, con objeto de asegurar la obtención de una muestra significativa de los cultivos de interés. De esta forma, se han tomado muestras representativas en zonas donde, tanto las características climáticas como las culturas agronómicas adaptadas, producen diferencias fenológicas importantes en el ciclo de desarrollo del cereal.

La definición de la segmentación territorial elaborada para el diseño de la campaña queda recogida en la figura 4. Se han considerado un total de 5 zonas, que han sido recorridas y muestreadas de forma independiente. El criterio de segmentación se ha basado en:

- La densidad de cultivos de primavera, observada en imágenes de satélite de años previos.
- La variabilidad climática, que se traduce en ciertas diferencias en la temperatura y pluviometría media (ver apéndice A.1.2.2). Dentro de La Mancha Occidental, existe un gradiente de altitud creciente desde la zona oeste - suroeste hacia la este y noreste, que produce cambios que pueden llegar a traducirse en dos o tres semanas de diferencia en la fecha de cosecha del cereal.

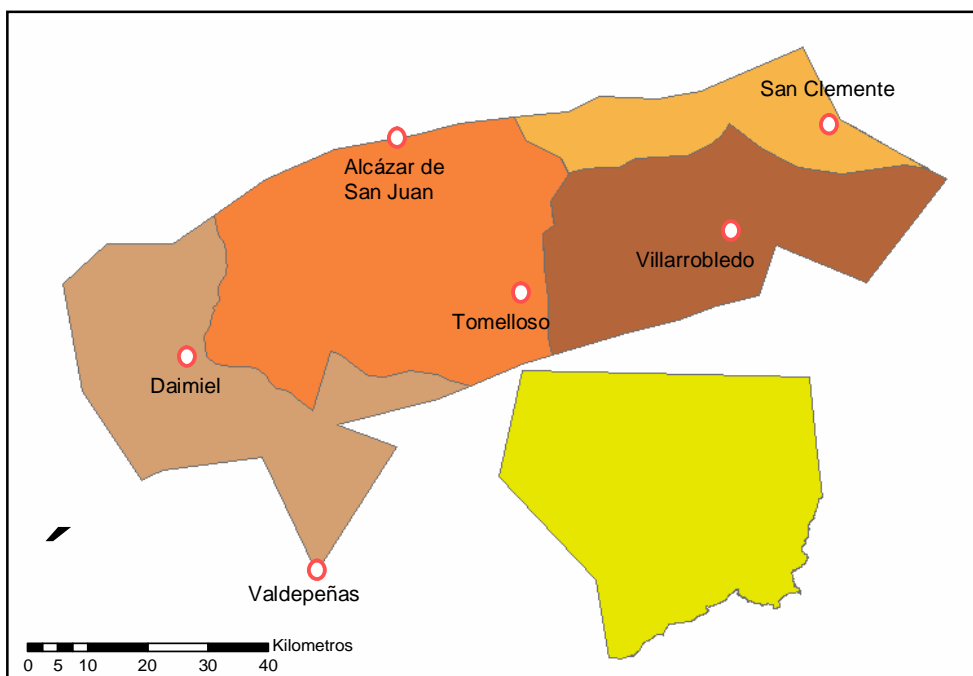


Figura 4. Segmentación territorial para la toma de muestras durante la primavera

En la campaña de primavera, se realizaron recorridos dentro de las zonas en las que según los datos disponibles (mapas de cultivos en regadío e imágenes de satélite adquiridas durante primaveras del periodo 2004-2008) existían mayores densidades de cultivos regados en esas fechas. Se recorrieron zonas donde, en los últimos años, se han observado explotaciones con parcelas extensas y de fácil acceso.

La cantidad de muestra objetivo ha sido fijada a partir de dos criterios:

- Alcanzar una tasa de muestreo superior al 3% del total de cereal existente. Este valor resulta el comúnmente utilizado en trabajos de estimación estadística.
- Aumentar este porcentaje hasta un valor en torno al 10% para el caso del cereal regado, ya que es donde los datos obtenidos van a ser más necesarios. Este tamaño muestral, siempre que se recoja homogéneamente en los distintos estratos supone un porcentaje representativo para un conjunto con características variables.

Estos porcentajes de muestreo se han cumplido en cada uno de los segmentos definidos. Para cada explotación visitada se ha comprobado el tipo de cultivo, su ubicación, la presencia de riego, la delimitación de la superficie regada, el sistema de riego empleado y se han medido características del cereal relacionadas con la probabilidad de existencia de riego.

## ***ii) Campaña de verano (herbáceos)***

El objetivo de esta campaña ha sido la delimitación de parcelas plantadas de cultivos herbáceos regados principalmente durante esta estación. Atendiendo a la leyenda temática de cultivos, las clases a muestrear son alfalfa, cebolla, girasol, hortalizas de hoja, maíz, melón, patata, pimiento, sandía, tomate y remolacha. En todos los casos, salvo la excepción del girasol, la presencia de este tipo de cultivos dentro de un territorio con clima semi-árido, como la Llanura Manchega, implica necesariamente la existencia de riego.

El muestreo ha sido de tipo dirigido, realizando itinerarios, durante el verano de 2009, a lo largo de toda la zona de estudio y contando con el apoyo de imágenes del satélite Landsat adquiridas durante los meses de junio y julio de 2009.

La recogida de muestras se ha adaptado a la densidad de cultivos en regadío, apreciable en las imágenes disponibles en el momento de realización de la campaña, tomando datos de campo a lo largo de ambos acuíferos para garantizar la representatividad de la muestra. De esta forma, la *verdad terreno* obtenida cubre, para cada cultivo, distintas situaciones en las que sus características, y consecuentemente la respuesta registrada en las imágenes, puedan sufrir cambios.

El objetivo de la campaña ha sido disponer de una cantidad suficiente de muestra para la definición, dentro de las diferentes zonas agronómicas, de grupos de parcelas que caractericen cada uno de los cultivos de referencia. Se ha incidido en las explotaciones de mayor tamaño, donde resulta más frecuente la presencia de cultivos de menor representatividad.

La heterogeneidad de cultivos y de etapas de desarrollo en varios cultivos implica la necesidad de tomar un porcentaje alto de muestra, por encima del 10% que se emplea en trabajos estadísticos en casos de elevadas densidades. La concentración de una parte muy considerable de la superficie regada en un conjunto limitado de explotaciones de gran tamaño, y el método de muestreo dirigido permiten que con un esfuerzo asumible sea posible recoger una cantidad de verdad terreno muy extensa.

Para cada explotación visitada se ha anotado el tipo de cultivo, su ubicación, la delimitación de la superficie regada, el sistema de riego empleado y el estado fenológico del cultivo en la fecha de la visita.

### ***iii) Campaña de verano (leñosos)***

El objetivo de la campaña de verano centrada en los cultivos leñosos ha sido la caracterización de viñedos en regadío y secano dentro de diferentes zonas en el área de estudio. También se han localizado explotaciones de otros cultivos leñosos en riego observadas durante los itinerarios realizados.

El viñedo se ha convertido en el cultivo con mayor extensión de riego dentro de la zona de estudio, por lo que el diseño de esta campaña se ha centrado en la recogida de datos relacionados con la distribución del riego en la vid y la observación de diferentes grados de desarrollo foliar en plantaciones con diferente conducción, edad y dotación de riego.

El trabajo de campo para el viñedo se ha realizado en dos etapas, llevadas a cabo en dos años sucesivos, 2008 y 2009.

En el primero de los años (2008), el objetivo de la campaña se centró en la identificación de los patrones de distribución del regadío y en la toma de muestra de forma que se pudiese llevar a cabo un procedimiento estadístico orientado a la estimación de la superficie en viñedo existente.

En el segundo año (2009), se aprovechó el conocimiento adquirido durante la campaña anterior para ajustar la zonificación asociada a la distribución del riego y recoger una muestra actualizada de viñedos en riego y secano.

La planificación de las fechas de las campañas de campo se ha basado en el desarrollo fenológico y el calendario estimado de riego para el viñedo en la zona. Así, el trabajo de campo se ha realizado de manera continua entre la segunda mitad del mes de julio y



finales de agosto<sup>4</sup>. No resulta conveniente comenzar antes, para así asegurar la presencia de infraestructuras de riego en las parcelas y la existencia de una situación de cierto estrés hídrico que facilite la diferenciación entre plantas en secano y en regadío.

El método de muestreo empleado ha cambiado entre la primera y segunda campaña, habiéndose seguido dos criterios diferentes en el diseño general.

En 2008, se eligieron como zonas de muestreo un conjunto de polígonos catastrales repartidos de forma homogénea a lo largo del conjunto de viñedo existente en los acuíferos estudiados, aunque la densidad de muestreo se intentó ajustar a la densidad de viñedo existente.

La elección de este tipo de muestreo se debe a la necesidad de obtener *verdad terreno* del viñedo para el conjunto del área de estudio. Se ha tenido presente que factores tales como la extensión y la diversidad de situaciones ambientales y edáficas en que aparece el cultivo, el grado de accesibilidad al agua, y la variabilidad de situaciones sociales y económicas y de culturas agrícolas, han de producir diferencias significativas en las características del viñedo en regadío entre diferentes zonas.

Partiendo de esta hipótesis de variabilidad espacial, para la campaña de 2009, se ha realizado un proceso de segmentación territorial, que se ha basado en la integración de diferentes criterios:

- Porcentaje de viña en regadío en relación al total de viña muestreada, para cada uno de los segmentos terreno visitados en campo durante 2008.
- Accesibilidad al agua, que ha sido estimada en función de la densidad de cultivos herbáceos en regadío durante el verano y por la aparición de cultivos típicos de zonas de secano, como el olivo.
- Grado de intensificación agraria, estimado en función de factores como el tamaño de parcelas, la cercanía a cursos de agua o la abundancia de viñas en espaldera y nuevas plantaciones.

Entre estos tres criterios, el porcentaje de viñedo en riego fue considerado como el de mayor peso. Este dato recoge el porcentaje local de superficie de viña en regadío existente en relación al total de superficie de viña, permitiendo el análisis de correlaciones espaciales dentro del territorio y de zonas con continuidad en los porcentajes de riego cuantificados.

La representación gráfica de la segmentación territorial elaborada a partir de los datos tomados en la campaña de 2008 se recoge en la Figura 5.

---

<sup>4</sup> En la Región Manchega, existe un dicho que afirma que el riego de la viña se produce “de Virgen a Virgen”, haciendo referencia a las celebraciones de la Virgen del Carmen (16 de Julio) y de la Asunción de la Virgen (16 de Agosto). Este periodo resulta desde luego, el de máxima extensión del riego, si bien muchas explotaciones también reciben agua fuera del mismo.

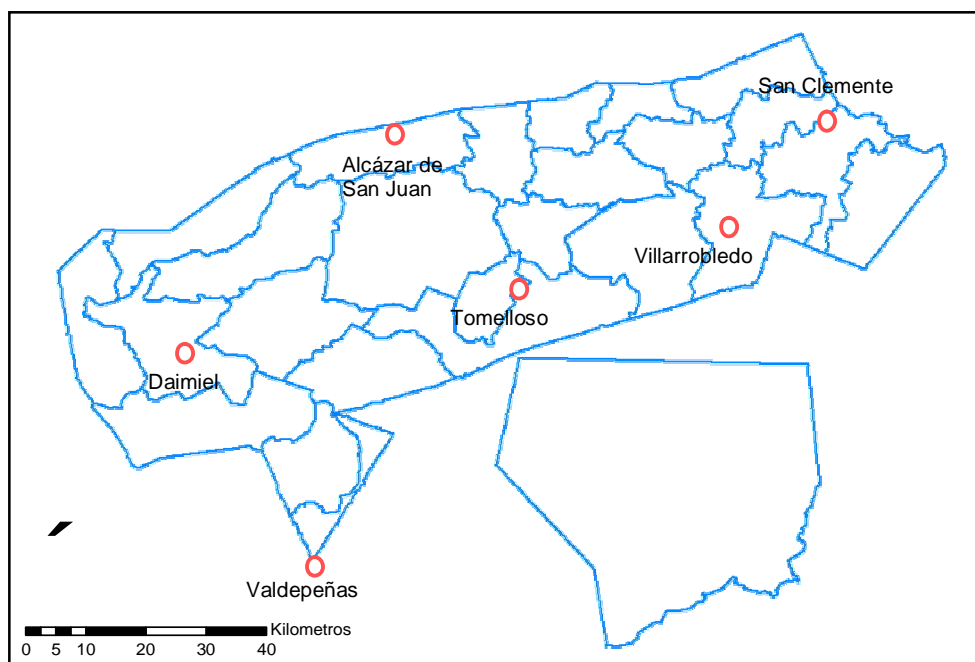


Figura 5. Segmentación territorial realizada tras la campaña de campo de viñedo de 2008

En total se definieron un total de 26 subzonas. Esta segmentación ha sido utilizada para el desarrollo metodológico correspondiente a la discriminación de viñedo en regadío en el año 2008, y ha sido la base para el diseño de la campaña de campo para la recogida de muestras de viñedo llevada a cabo en 2009.

Conforme a las necesidades de la metodología para la estimación del riego de viña en 2009, se han tomado datos de campo con dos objetivos diferentes:

- Elaboración del mapa de viña en regadío: basada en muestreos para cada una de las zonas resultantes de la segmentación territorial obtenida para 2008.
- Proceso de validación. En este caso se han muestreado las zonas donde se realizó un vuelo multiespectral durante el verano de 2009 (ver apartado 3.3.1.5). En las áreas voladas, se llevó a cabo un trabajo adicional de recogida de datos, tomando la mayor cantidad posible de información con objeto de realizar el proceso de validación de la calidad del mapa de viña regada y la evaluación de la mejora potencial de resultados que podría obtenerse al trabajar con datos de mayor resolución espacial.

En relación a los datos utilizados para la elaboración del mapa de viña regada de 2009, el método de muestreo elegido ha consistido en la elaboración de itinerarios dentro de las zonas resultado de la segmentación territorial expuesta (segmentos de muestreo), que han sido recorridas y muestreadas de forma independiente.

Así, la distribución de muestreo se ha adaptado a las características de las diferentes zonas de cultivo de la viña existentes en el territorio analizado. El trabajo de campo realizado ha permitido la obtención de *verdad terreno* en las diversas culturas agrícolas y

situaciones ambientales de altitud, climatología y edafología que concurren en los acuíferos sobreexplotados.

Dentro de cada una de las zonas resultado del proceso de segmentación, se espera que las características y densidad del viñedo en regadío presenten valores similares, de forma que se garantice la coherencia y extrapolabilidad de los datos de campo en relación al conjunto de la viña existente en cada zona.

Los itinerarios se han diseñado bajo el criterio de representatividad espacial dentro de cada subzona, para lo cual se ha puesto especial énfasis en tomar muestras en áreas distribuidas regularmente dentro de cada uno de los segmentos definidos. De esta forma, la *verdad terreno* obtenida cubre distintas situaciones en las que el viñedo puede sufrir cambios, debido tanto a la existencia de riego, como a otros factores relacionados con la características del suelo, con el marco y sistema de plantación o con prácticas agrícolas específicas.

El criterio seguido para fijar el tamaño de la muestra utilizada para la elaboración del mapa de viña regada de 2009, ha sido el de asegurar un porcentaje de muestreo de, al menos, un 10% del total del viñedo presente en el total de cada zona.

Por otro lado, en relación a los datos tomados para el proceso de validación, se han realizado recorridos en zigzag desde el origen de la zona volada hasta el punto final, en los que se han visitado la mayoría de las explotaciones de viñedo.

Los datos recogidos en campo han sido los mismos para las dos campañas de muestreo (2008 y 2009). Para cada explotación visitada se ha comprobado la existencia de riego, tipo de cultivo, su ubicación, delimitación de la superficie regada, sistema de riego empleado, sistema de plantación y otros datos de interés que pudiesen ayudar a la caracterización del regadío.

### **3.2.2. Desarrollo y datos recogidos en las campañas de campo**

Debido a las características propias asociadas al diseño de cada campaña, la descripción acerca de su desarrollo y de los datos recogidos se describe de forma separada. No obstante, los aspectos relacionados con la operativa de la toma de datos resultan comunes a todas las campañas, por lo que son descritos antes de entrar en aspectos más específicos.

El material utilizado en el trabajo de campo para la recogida de datos consistió en un ordenador portátil equipado con un sistema integrado de SIG-GPS dinámico, especialmente diseñado para el desarrollo de este tipo de tareas.

El sistema es capaz de manejar y visualizar conjuntamente imágenes de satélite, ortofotografía, cartografía o cualquier otro tipo de dato georreferenciado, al mismo tiempo que los integra con los datos proporcionados, en tiempo real, por el receptor GPS.

Los datos geográficos accesibles al sistema y que han servido de base a los muestreos han sido:

- Cartografía digital de la delimitación administrativa de perímetros de sobreexplotación, términos municipales y de las principales vías de comunicación.
- Red de caminos rurales y carreteras extraída de la cartografía de usos del suelo generada en el proyecto SIGPAC.
- Parcelario del Catastro de rústica.
- Ortofoto digital del año 2006 generada en el marco del PNOA (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea).
- Composiciones en color infrarrojo elaboradas a partir de las imágenes de satélite, más actualizadas, disponibles a fecha de la realización de cada campaña.
- Mapas topográficos a escala 1:50.000, pertenecientes a la serie del MTN (Mapa Topográfico Nacional) generada por el IGN (Instituto Geográfico Nacional).

Para la realización de los trabajos de campo se empleó un receptor GPS conectado a un ordenador portátil en el que está instalado el SIG para la toma de datos en campo. El sistema informático debe ser configurado para que sea capaz de recibir, integrar y almacenar los datos transmitidos por el GPS. Así, la posición dada por el receptor se representa gráficamente en la pantalla del ordenador junto a la cartografía, imágenes de satélite u otros datos espaciales, lo que permite conocer en todo momento la localización exacta del equipo de campo evitando errores de orientación al buscar las parcelas deseadas (Figura 6).

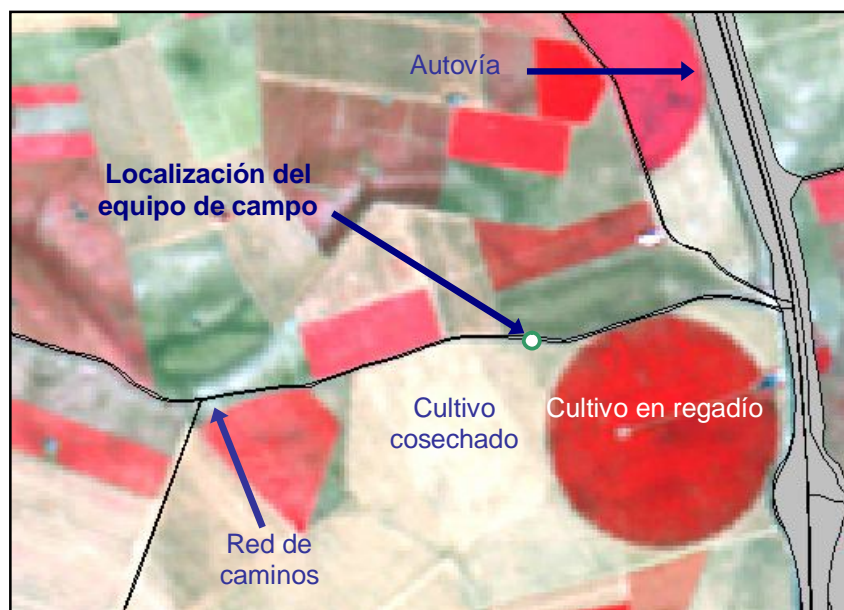


Figura 6. Localización de la posición del equipo de campo sobre una composición en color infrarrojo.

De esta manera, conocemos nuestra posición en tiempo real con relación a las explotaciones a visitar, ubicándose la posición del vehículo con un punto sobre la ortofoto o imagen de satélite que se esté visualizando en ese momento.

Durante el desarrollo de las campañas de campo, dos de los datos disponibles, la red de caminos y la imagen de satélite de fecha más reciente, han sido especialmente útiles para poder optimizar el proceso de toma de datos.

La disponibilidad de la cartografía de caminos permite que en el diseño de la campaña se marquen itinerarios que siguen rutas directas entre los puntos de interés. Además, en caso de que algún camino no se encuentre en buenas condiciones o se encuentre cortado por cualquier motivo, se puede diseñar una ruta alternativa que permita llegar rápidamente al siguiente punto de muestreo. Las vías recogidas en la cartografía corresponden generalmente a caminos comunales o de la red general, que suelen encontrarse en buen estado. Además, el empleo de esta cartografía evita que se entre en caminos que no tienen continuidad o de acceso a naves y viviendas, lo que supone un ahorro considerable de tiempo en la realización de los trabajos de muestreo.

El uso de una imagen de satélite de fecha reciente y adquirida durante el periodo de riego de los cultivos objeto de la toma de datos, mejora de forma considerable la calidad de los muestreos y optimiza su tiempo de realización. A partir de la interpretación de las composiciones en color infrarrojo, el equipo de campo dispone de información actualizada y sobre la totalidad del territorio, acerca de la distribución espacial de los cultivos regados. De esta forma, los muestreos resultan más completos, extensos y permiten la obtención de una mayor cantidad de datos.

La descripción de los datos de verdad terreno tomados a lo largo de cada campaña quedan recogidos en los siguientes epígrafes.

#### ***i) Campaña de primavera***

La campaña de primavera ha tenido por objeto identificar los cultivos cuyo desarrollo fenológico y su demanda de riego se producen en esta época del año. Aunque no suponen un consumo de agua por hectárea tan elevado como los cultivos que tienen su desarrollo en verano, los regadíos de primavera suponen un porcentaje elevado dentro de la extensión total de superficie en regadío de la Cuenca Alta del Guadiana.

El principal cultivo muestreado en esta campaña ha sido el cereal de invierno, distinguiéndose en campo entre distintos tipos de cereales: cebada, trigo y avena. Otros cultivos muestreados fueron leguminosas (guisante y otras), forrajeras (alfalfa y prado) bulbosas (ajo y cebolla), crucíferas y otros minoritarios. También se han anotado parcelas con elevadas densidades de malas hierbas y vegetación natural, con objeto de que sirvan de contraste y no sean confundidas con cereales u otros cultivos dentro de los procesos de análisis multiespectral.

La campaña de campo consistió en la recopilación de datos para una serie de parcelas distribuidas en transectos a lo largo de toda la zona de estudio. Todas y cada una de esas parcelas fueron visitadas en tres momentos diferentes (abril, mayo y junio) con el objetivo de evaluar la evolución de su desarrollo y maximizar la posibilidad de observarlas en riego.

Para cada una de esas parcelas y en cada una de las tres fechas se recogió información acerca del tipo de cultivo, de la infraestructura de riego y del uso efectivo o posible de dicha infraestructura, así como otros indicios, como la presencia de pozos, tuberías o cualquier otro material de riego, que pudieran aportar información acerca de la posibilidad de que en algún momento esa parcela pudiese haber sido regada.

En el caso de las parcelas de cereal se procedió, en cada una de las tres visitas, a calcular la altura media del cultivo midiendo en diferentes puntos de la parcela, a evaluar su densidad en una escala de cinco valores posibles y además, en la tercera visita, a pesar varias espigas tomadas al azar en diferentes puntos de la parcela. Este proceso se ha repetido tanto en parcelas en riego intensivo o posible riego de apoyo como en parcelas de secano, con el objetivo de intentar relacionar los valores obtenidos con las evidencias de riego anotadas. A pesar de que la fracción de cubierta vegetal es, según la bibliografía existente, el parámetro agronómico que mejor puede definir la relación entre respuesta observada en imágenes de satélite y existencia de riego, la dificultad para medirlo de una forma rápida, fiable y sistemática en un conjunto amplio de parcelas ha impedido su empleo<sup>5</sup>, siendo sustituido por medidas de parámetros más sencillos de identificar y que resultan representativos del estado del cultivo.

Los datos de número de parcelas y superficies muestreadas por tipo de cultivo se recogen en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos recogidos en la campaña de campo de primavera por tipo de cultivo.

CAMPAÑA PRIMAVERA		
Cultivo	Nº parcelas muestreadas	Superficie (ha)
Avena	5	87,4
Barbecho /malas hierbas	11	300,5
Cebada	150	3.907,1
Leguminosas	17	350,2
Trigo	70	1.807,8
<b>TOTAL</b>	<b>253</b>	<b>6.453,0</b>

<sup>5</sup> A pesar de que existen procesos simplificados, basados en el empleo de fotografía cenital, para la estimación de la fracción de cubierta vegetal (González-Piqueras, 2006), éstos necesitan de un montaje y preparación de un equipo de trípode y cámara, que han desaconsejado su uso en una campaña tan extensa como la desarrollada (con medios limitados) dentro del presente estudio.

Las parcelas muestreadas han sido digitalizadas tomando como base cartográfica los límites de las parcelas catastrales y empleando como referencia imágenes SPOT de 2009 (ver apartado 3.3). Posteriormente a cada una de las parcelas definidas, (elemento gráfico) se le han asociado los datos recogidos en campo (información alfanumérica). Como resultado, se ha obtenido una cartografía conectada a una base de datos donde se incluye, para cada representación gráfica, la siguiente información:

- Tipo de cultivo
- Categoría según existencia de riego: donde se distingue para el caso de los cereales entre riego, posible riego de apoyo, posible secano, secano cuidado y secano
- Tipo de sistema de riego
- Altura medida en cada visita
- Densidad del cultivo apreciada en cada visita
- Peso de espigas secas en la última visita
- Observaciones, donde se han anotado cualquier evidencia observada en campo relacionada con la existencia o no de riego en la parcela

La distribución espacial de la muestra recogida se relaciona con la segmentación territorial previa y cubre las diferentes zonas de cultivo existentes dentro de la zona de estudio.

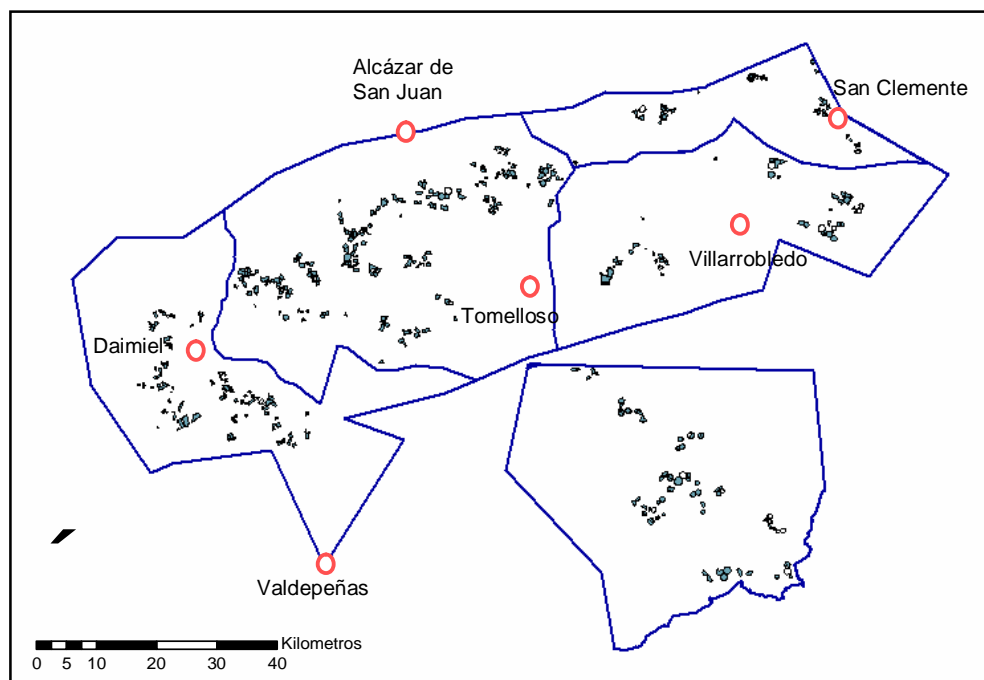


Figura 7. Distribución de la muestra tomada durante la campaña de primavera de 2009

## ii) Campaña de verano (herbáceos)

Se han realizado dos campañas de campo diferenciadas: una primera durante los meses de verano que ha servido para obtener la información necesaria para la elaboración del mapa de cultivos regados durante el verano de 2009, y una segunda llevada a cabo en otoño, utilizada tanto para realizar un proceso de validación de la fiabilidad de los resultados obtenidos a partir de una muestra totalmente independiente de la recogida durante la primera campaña, como para ampliar el muestreo a los cultivos regados durante esta estación.

Durante la campaña de verano, realizada durante los meses de julio y agosto, se contó con imágenes adquiridas en junio y julio de 2009 por el satélite Landsat, lo que ha permitido disponer de información actualizada acerca de la presencia y distribución de las explotaciones en riego dentro del área de estudio.

La disponibilidad de imágenes correspondientes al verano en curso ha revertido en una mejora de la planificación de la campaña y en una optimización de la superficie visitada.

Los principales cultivos muestreados pertenecen a los géneros de las solanáceas (pimiento, patata y tomate), alfalfas y praderas, cucurbitáceas (melón y sandía), cereales (maíz), compuestas (girasol), hortalizas de temporada y bulbos (ajo y cebolla).

Tabla 6. Datos sobre la campaña de campo de verano para herbáceos, por tipo de cultivo.

CAMPAÑA VERANO (herbáceos)		
Cultivo	Nº parcelas muestreadas	Superficie (ha)
Adormidera	6	168,5
Ajo	100	1.609,0
Alfalfa	38	297,5
Calabacín	3	24,5
Cebolla	276	1.683,0
Girasol	13	258,1
Hortaliza	16	96,6
Maíz	111	743,9
Melón	498	2.934,2
No identificado	1	14,9
Patata	66	202,6
Pimiento	85	539,9
Prado	21	338,6
Remolacha	5	15,6
Tomate	33	263,3
<b>TOTAL</b>	<b>1.272</b>	<b>9.190,2</b>



Durante el otoño de 2009, se llevó a cabo una campaña adicional de campo orientada a la recogida de datos para el contraste/validación del mapa digital de cultivos en regadío y a la visita de explotaciones regadas durante el otoño.

Las zonas visitadas fueron previamente definidas en un trabajo de gabinete, estando formadas por un conjunto de parcelas observadas en riego durante las imágenes adquiridas por los satélites a lo largo del verano, y que no fueron visitadas durante la campaña de verano. La campaña de campo se realizó dentro del acuífero de La Mancha Occidental, en un recorrido longitudinal de este a oeste, en el que se visitaron explotaciones del mayor tamaño posible y ocupadas por la mayor variedad posible de cultivos incluidos en la leyenda temática del mapa de cultivos herbáceos en regadío.

Aunque la práctica totalidad de los cultivos habían sido recogidos, los restos de cosecha, materiales agrícolas y los rastrojos existentes permitieron identificar el cultivo existente en cada caso (ver Tabla 7).

Tabla 7. Datos sobre la campaña de campo de otoño, por tipo de cultivo

CAMPAÑA OTOÑO		
Cultivo	Nº parcelas muestreadas	Superficie (ha)
Ajo	35	367,4
Alcachofa	1	4,4
Alfalfa	7	32,2
Cebolla	26	142,0
Cereal	9	211,0
Forrajera de otoño	1	55,8
Hortaliza de otoño	3	7,6
Judías	1	17,0
Maíz	12	128,5
Maíz tardío	4	107,3
Melón	91	612,1
Patata	5	29,9
Pimiento	32	234,8
Repollo	1	5,0
Tomate	1	5,6
Viña	1	1,0
<b>TOTAL</b>	<b>230</b>	<b>1.961,6</b>

Esta separación en los muestreos resulta aconsejable, teniendo en cuenta el método de muestreo utilizado. Durante las campañas de campo de verano se produce un sesgo positivo en la toma de muestras hacia aquellos cultivos que se encuentran en una fase avanzada de su ciclo fenológico durante el comienzo de la estación, ya que su presencia se observa con mucha mayor claridad en las imágenes disponibles.

Las parcelas muestreadas durante las campañas de verano y otoño han sido digitalizadas tomando como base cartográfica los límites de las parcelas catastrales y empleando como referencia las imágenes de 2009. Posteriormente a cada una de las parcelas definidas se le han asociado los datos recogidos en campo, obteniendo una base de datos conectadas a la cartografía donde se incluye para cada elemento gráfico la siguiente información:

- Tipo de cultivo
- Tipo de sistema de riego
- Campaña en la que se ha realizado el muestreo
- Observaciones, donde se han anotado cualquier evidencia observada en campo relacionada con el desarrollo fenológico del cultivo

La distribución de las parcelas muestreadas dentro del área de estudio queda recogida dentro de la Figura 8.

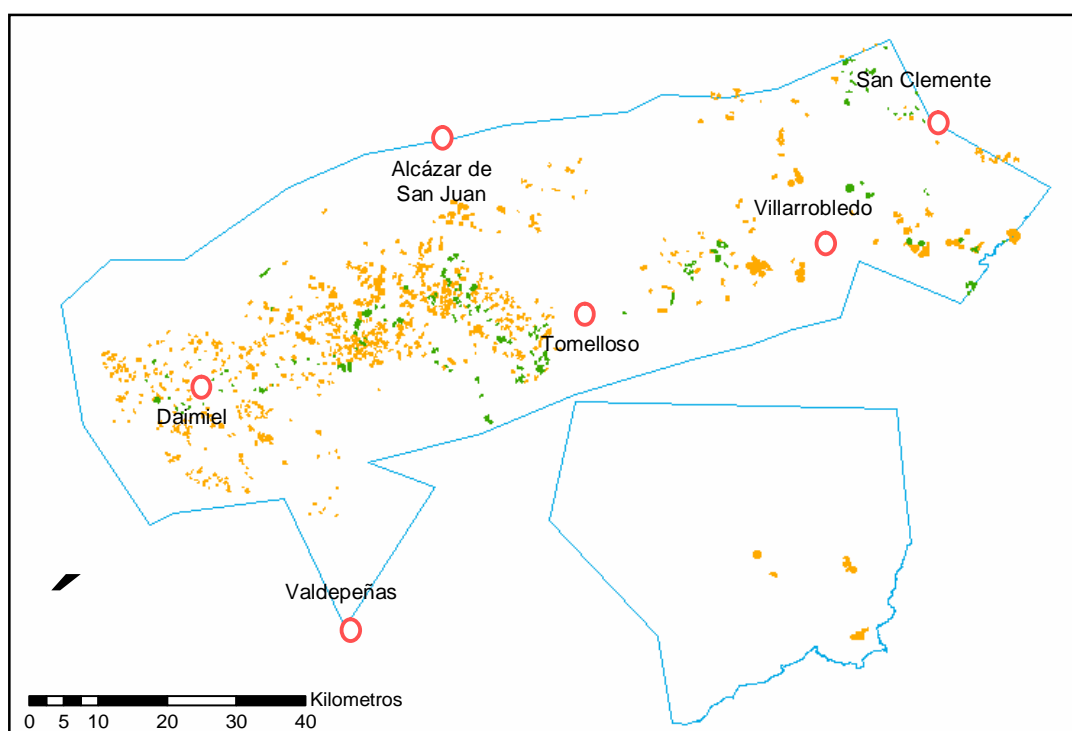


Figura 8. Distribución de parcelas muestreadas durante la campaña para herbáceos de verano. En color naranja, se representa la muestra recogida en verano y en color verde, la recogida en la campaña de otoño.

### ***iii) Campaña de verano (leñosos)***

Tal y como se ha comentado en la fase de diseño, la campaña de leñosos se ha centrado en el viñedo y se ha realizado en dos años consecutivos (2008 y 2009).

El principal objetivo, en ambos años, ha consistido en la visita y toma de datos en viñedos, si bien se ha anotado la posición y delimitación de cualquier otro cultivo leñoso en regadío que haya sido observado.

Tanto en 2008 como en 2009, hemos contado con imágenes del satélite Landsat del verano en curso y del satélite SPOT del verano inmediatamente anterior. Este segundo tipo de imágenes presenta una mejor resolución espacial lo que facilita la identificación de los viñedos. Además, se ha dispuesto de mapas de distribución del viñedo, actualizados al año anterior de la realización de cada campaña, y de cartografía de delimitación de las parcelas catastrales.

Durante 2008, la campaña se llevó a cabo recorriendo una serie de segmentos de muestreo definidos previamente y correspondientes a envoltantes de polígonos catastrales, con una presencia importante de viñedo. La elección de segmentos de muestreo se llevó a cabo bajo los criterios de encontrarse homogéneamente repartidos dentro de cada zona y asegurar un porcentaje de muestreo de al menos un 5% del total del viñedo presente en el total de los acuíferos sobreexplotados (Figura 9). Además, se realizó un muestreo más específico en cuatro zonas del acuífero, regularmente repartidas en un transecto este – oeste, con objeto de realizar un proceso de validación de los resultados obtenidos en la discriminación de presencia de riego en el viñedo.

Dentro de los segmentos se visitaron todas las parcelas de viña que resultaron accesibles, tomando datos acerca de la presencia o ausencia de riego, la edad de la plantación, el tipo de conducción de las plantas y el sistema de riego, en su caso.

Tabla 8. Datos de la campaña de campo de leñosos de 2008, por tipo de cultivo.

<b>CAMPAÑA VERANO (Viña)</b>		
<b>Cultivo</b>	<b>Nº parcelas muestreadas</b>	<b>Superficie (ha)</b>
Viña en secano	4.556	9.074,3
Viña nueva	96	240,3
Viña vaso goteo	1.752	5.754,4
Viña espaldera goteo	1.187	4.787,1
Viña joven vaso goteo	15	33,6
Viña joven espaldera goteo	120	426,6
Viña aspersión	70	143,9
Viña abandonada	22	49,8
Cultivos arbóreos en regadío	21	36,9
<b>TOTAL</b>	<b>7.839</b>	<b>20.546,8</b>

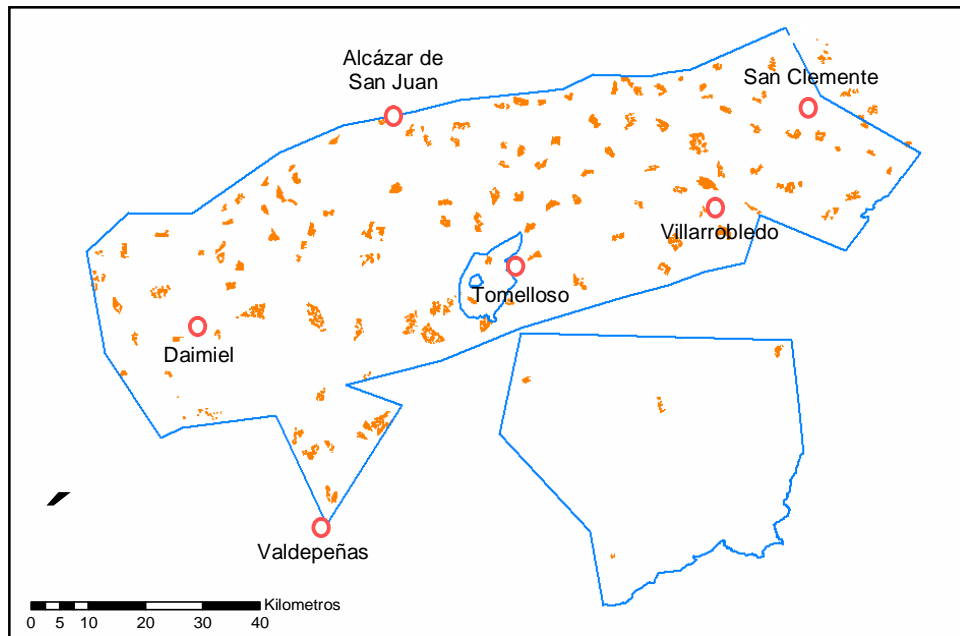


Figura 9. Parcelas de viñedo muestreadas en el ámbito de estudio durante la campaña de 2008.

Durante la campaña de 2009, y conforme a las necesidades de la metodología diseñada para la estimación del riego en la viña, se han tomado datos de campo con dos objetivos diferentes: la elaboración del mapa de viña en regadío y su posterior validación.

Las parcelas de viñedo muestreadas han sido agrupadas en diferentes categorías en función de las observaciones realizadas en campo sobre existencia de riego y fase de producción de las plantas.

En relación a la existencia de riego se han considerado tres categorías:

- En regadío, cuando se ha constatado la presencia de riego.
- Posible riego, donde se han incluido todas aquellas parcelas donde las viñas presentan un desarrollo foliar similar al de plantas regadas, pero donde no se ha apreciado la presencia de ningún sistema de riego en uso. Estas parcelas han sido analizadas posteriormente para intentar determinar la posible existencia de riego sobre la serie temporal disponible de imágenes de satélite. Para ello, se han buscado bandeados en la respuesta de bloques de viñas en la parcela que pudiesen haber sido producidos por la presencia de sistemas de aspersión móvil o de goteos que hayan sido cambiados de posición. En caso de no observarse esta práctica, ni un cambio brusco de respuesta entre fechas, achacable a la existencia de un riego puntual de elevada dotación, estas parcelas han sido reasignadas a la categoría de seco.
- Seco, donde no se han observado evidencias de presencia de riego.

En relación a la edad de la planta también se han considerado tres categorías:

- Viña nueva, en caso de visitarse parcelas plantadas el mismo año, donde la vid aún no presenta apenas cubierta vegetal.
- Viña joven, plantas de poca edad, con desarrollo foliar aún escaso y, por tanto, con necesidades hídricas reducidas.
- Viña en producción, donde se engloban la mayoría de las viñas visitadas.

Además, se han delimitado otros cultivos leñosos observados en regadío durante la campaña de campo (principalmente olivo), anotándose sus características para su inclusión en el mapa final de cultivos en regadío en la zona de estudio.

La superficie muestreada de viñedo en producción en cada campaña de campo, tras el proceso de reasignación de la viña “en posible riego”, se recoge en las Tablas 9 y 10.

Tabla 9. Superficie muestreada en la campaña de campo para la elaboración del mapa de cultivos leñosos en regadío de 2009.

CULTIVO	Nº parcelas muestreadas	Superficie (ha)	% Superficie
Viña en secano	4.977	9.952,3	29,0%
Viña en riego	6.456	23.796,9	69,4%
Cultivos arbóreos en riego	151	559,5	1,6%
<b>TOTAL</b>	<b>11.584</b>	<b>34.308,7</b>	<b>100%</b>

Tabla 10. Superficie muestreada en la campaña de campo para el proceso de validación.

CULTIVO	Nº parcelas muestreadas	Superficie (ha)	% Superficie
Viña en secano	727	1.078,3	23,8%
Viña en riego	1.023	3.411,8	75,2%
Cultivos arbóreos en riego	12	46,8	1,0%
<b>TOTAL</b>	<b>1.762</b>	<b>4.536,9</b>	<b>100%</b>

En total se han muestreado 13.346 parcelas que cubren una superficie de 38.845 hectáreas, de las cuales, el 71% pertenece a cultivos en regadío. Este porcentaje se encuentra sesgado al alza, ya que durante la sistemática de la campaña no se han muestreado parcelas predefinidas, sino todas aquellas observadas durante los itinerarios. Durante las visitas, ha sido posible tomar datos de viñedos en espaldera y con riego instalado observados a distancia, pero nunca de viñedos en secano si no se ha podido acceder hasta la misma parcela. Además durante el inicio de la campaña no se tomaron datos de parcelas observadas en secano en las que, de acuerdo a los datos disponibles, se apreciaban indicios relacionados con la presencia de riego, ya que se consideró que los sistemas de goteo o aspersión podrían instalarse posteriormente.

La superficie de viña joven en riego asciende a 694,7 hectáreas, y no se ha incluido en la muestra empleada para la discriminación del riego al ser una fuente potencial de error, ya que la respuesta espectral de este tipo de parcelas es más propia del secano que del regadío, dada su reducida cubierta vegetal.

Los datos tomados en campo han sido asignados a las parcelas correspondientes del mapa de viña de los acuíferos sobreexplotados. Así, cada parcela visitada en campo, ha quedado ligada a una base de datos donde se incluye, para cada elemento gráfico, la siguiente información:

- Tipo de cultivo
- Categoría según existencia de riego
- Tipo de sistema de riego
- Sistema de plantación
- Observaciones, donde se han anotado cualquier evidencia observada en campo relacionada con la existencia o inexistencia de riego en la parcela.

La distribución de las parcelas muestreadas dentro del conjunto de la campaña se recoge en la Figura 10.

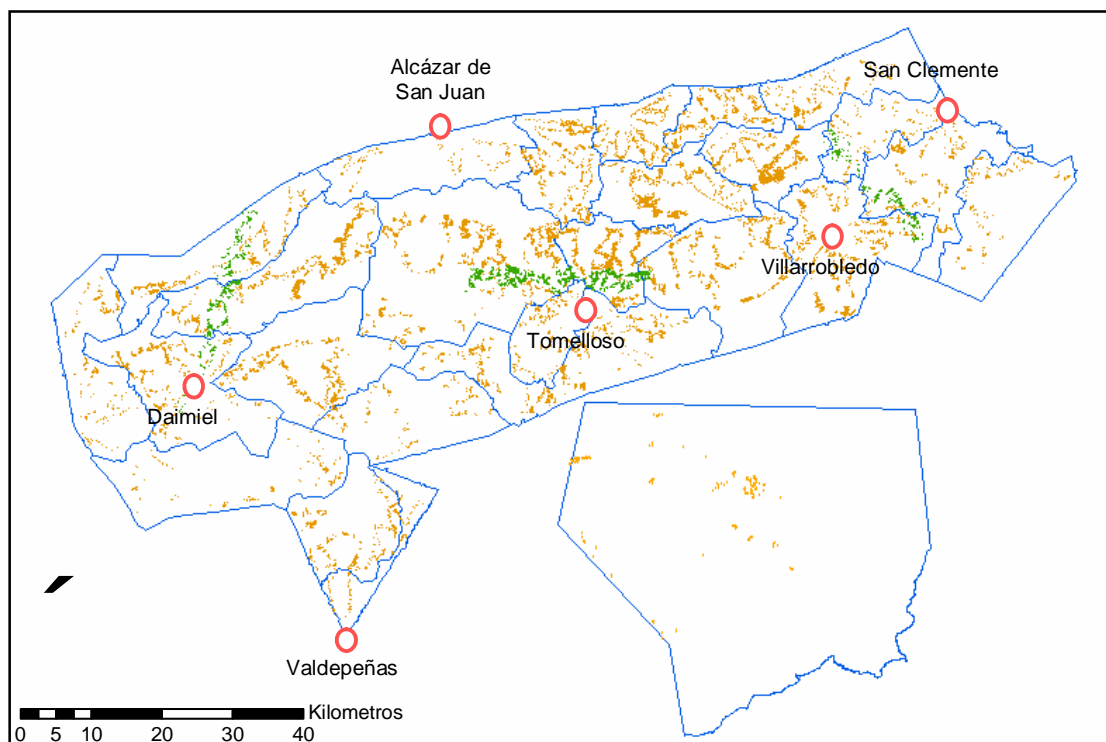


Figura 10. Parcelas de viñedo muestreadas en la campaña de 2009, en el ámbito de estudio. Las líneas azules representan la segmentación utilizada en el diseño de la campaña de campo. Los polígonos en color naranja recogen la muestra recogida para la elaboración del mapa de viña en regadío, mientras que los polígonos verdes muestran las parcelas visitadas para la obtención de datos para el proceso de validación.

### **3.3. Adquisición de datos de Observación de la Tierra**

La selección de las imágenes más adecuadas para la cuantificación de las superficies regadas en la Cuenca Alta del Guadiana se ha efectuado atendiendo a las características de los cultivos de la zona, el tamaño de parcelación, el calendario de riego, y el coste y operatividad asociados a la adquisición de los datos.

Teniendo en cuenta los factores relacionados con la discriminación del riego en los cultivos, resulta necesario disponer de imágenes de satélite que cubran los periodos de riego de los diferentes cultivos. Estas imágenes deben presentar una resolución suficiente en relación al tamaño de las parcelas de los diferentes cultivos. Dado que la mayoría del riego se produce en explotaciones de más de una hectárea, la familia de satélites de alta resolución espacial resulta suficiente para el estudio de los cultivos herbáceos. Para el análisis de los cultivos leñosos, es recomendable una resolución espacial superior, con objeto de disminuir la mezcla entre la respuesta proveniente del suelo y de la propia vegetación.

Sin necesidad de profundizar en el análisis de cual es el satélite más conveniente, esta elección ha quedado directamente determinada por el coste de adquisición de las imágenes. La puesta en marcha del Plan Nacional de Teledetección en 2008 ha posibilitado que los diferentes Organismos y Centros de Investigación ligados a la Administración General del Estado o a las Comunidades Autónomas puedan disponer, de forma gratuita, de un conjunto de imágenes de satélite<sup>6</sup>.

En el segmento de satélites de alta resolución, se han adquirido el conjunto de imágenes Landsat captadas sobre el territorio nacional desde principios de mayo de 2008 hasta finales de 2009, además de una cobertura anual para ambos años del satélite SPOT en modo multiespectral. Como complemento, también se ha adquirido una imagen de muy alta resolución, correspondiente al sensor pancromatico del satélite SPOT (2,5 m).

Además de imágenes de satélite de los años 2008 y 2009, para la presente investigación se han recopilado otros datos de Observación de la Tierra, consistentes en imágenes de satélite correspondientes a años anteriores y ortofotografía digital. Como complemento, y con objeto de profundizar en el estudio del viñedo, se ha adquirido un vuelo multiespectral de muy alta resolución realizado sobre varias zonas del acuífero de La Mancha Occidental.

#### **3.3.1. Características de los datos adquiridos**

En los siguientes apartados se describen las características generales y particulares de los datos adquiridos.

---

<sup>6</sup> El conjunto de imágenes disponibles sobre los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana ha sido puesto a disposición de la Comisaría de Aguas de la CHG, quien a su vez las ha cedido para la realización de la presente investigación.

### 3.3.1.1. Imágenes del satélite Landsat

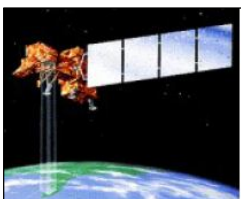
La serie de satélites Landsat resulta, sin duda, la fuente de datos de teledetección más ampliamente utilizada para la realización de estudios sobre el territorio desde su lanzamiento, en el año 1972, hasta la actualidad.

Desde 2003, el único satélite operativo de la serie es el Landsat 5, que ha sido el empleado en el este estudio.

Entre las características más importantes de la serie Landsat (Tabla 11), cabe destacar:

- Registro de datos en 7 bandas espectrales (3 en el visible, 3 en el infrarrojo próximo y 1 en el infrarrojo térmico).
- Periodicidad en las observaciones (el satélite pasa cada 16 días por la misma zona, a la misma hora solar).
- Catálogo continuo de imágenes que incluye la totalidad de las adquisiciones.
- Resolución espacial de 30 metros, equivalente a una escala métrica de trabajo de 1:150.000.
- Elevada cobertura sobre el territorio, cubriendo cada escena una superficie aproximada de 35.000 km<sup>2</sup>.

Tabla 11. Características generales del satélite Landsat 5

Fecha de lanzamiento	Marzo de 1984			
Altura de órbita (km)	705			
Periodo / Revisita	96,5 minutos / 16 días			
Características del sensor: Thematic Mapper (TM)				
Banda	Nombre	Longitud de onda (μm)	Resolución espacial (m)	
Banda 1	Azul (A)	0,45 – 0,52	30	
Banda 2	Verde (V)	0,52 – 0,60	30	
Banda 3	Rojo (R)	0,63 – 0,69	30	
Banda 4	Infrarrojo cercano (NIR)	0,76 – 0,90	30	
Banda 5	Infrarrojo reflejado (SWIR)	1,55 – 1,75	30	
Banda 6	Infrarrojo térmico (TIR)	10, 42 – 12,50	120	
Banda 7	Infrarrojo medio (MI)	2,08 – 2,35	30	



Los acuíferos de La Mancha occidental y del Campo de Montiel se encuentran localizados en las escenas 200-33 y 201-33 del Sistema Mundial de Referencia Landsat (Figura 11).

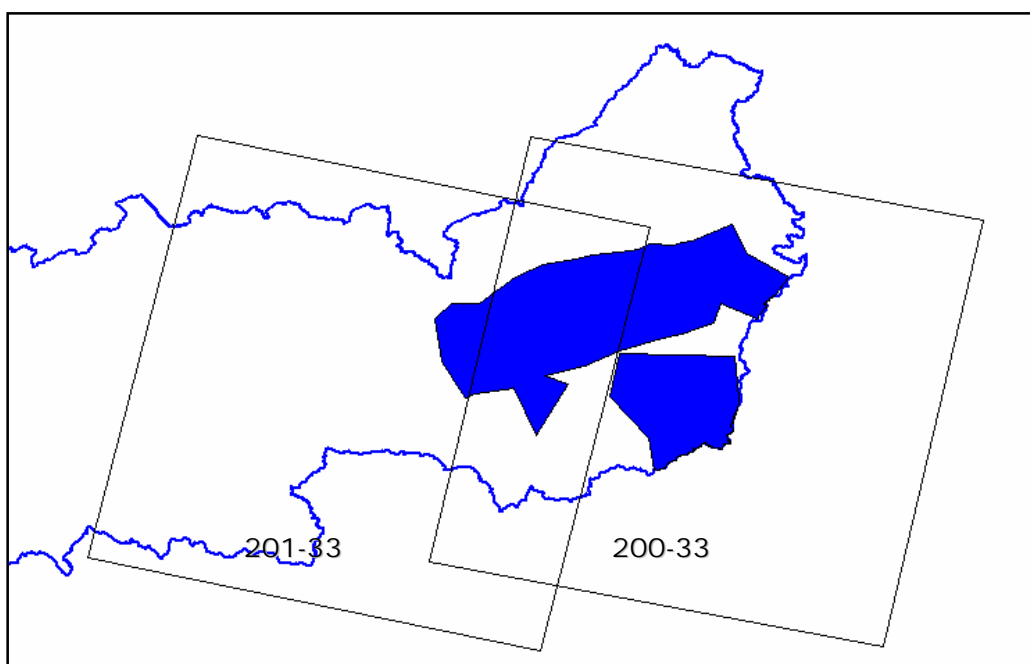


Figura 11. Localización de la zona de estudio en el Sistema de Referencia Landsat.

La elección de las fechas de pasada más adecuadas se ha realizado atendiendo al desarrollo vegetativo de los cultivos más representativos en la zona de estudio (ver capítulo 3.1). Se han identificado las imágenes coincidentes con los periodos de riego y con los momentos en que los cultivos ofrecen una mayor cubierta foliar. De este conjunto, se han eliminado aquellas en que la elevada cobertura nubosa impide la extracción de información de interés, habiéndose recopilado dos amplias series temporales de imágenes para los años 2008 y 2009 (Tabla 12).

Tabla 12. Imágenes adquiridas del satélite Landsat

PERIODO	FECHA DE ADQUISICIÓN			
	2008		2009	
	Escena 200-33	Escena 201-33	Escena 200-33	Escena 201-33
Primavera	06/03/2008 23/04/2008	01/06/2008	25/03/2009 28/05/2009	01/04/2009
Verano	26/06/2008 12/07/2008 28/07/2008 13/08/2008 29/08/2008 14/09/2008	03/07/2008 04/08/2008 20/08/2008	13/06/2009 29/06/2009 15/07/2009 31/07/2009 16/08/2009 01/09/2009	20/06/2009 23/08/2009
Otoño	30/09/2008 17/11/2008		19/10/2009	24/09/2009


### 3.3.1.2. Imágenes del satélite SPOT

La serie de satélites SPOT ofrece imágenes de alta calidad radiométrica y una resolución espacial que mejora sustancialmente la de Landsat. Dentro del PNT, se han adquirido coberturas tomadas por el satélite SPOT 5 para toda España, tanto para el año 2008, como para el año 2009.

Dentro de la Tabla 13, se muestran las características más significativas del satélite SPOT 5, entre las que destacan:

- Registro de datos en 4 bandas multispectrales, con una resolución espacial de 10 metros, dos de ellas en la región del visible y otras dos en la región del infrarrojo.
- Registro adicional de datos en una banda pancromática, que cubre gran parte del visible, con una resolución de 2,5 metros.
- Imágenes suministradas bajo petición, programándose una ventana temporal de fechas entre las que se llevará a cabo la adquisición.

Tabla 13. Características generales del satélite SPOT 5

Fecha de lanzamiento	Mayo de 2002			
Altura de órbita (km)	832			
Periodo / Revisita	101 minutos / 3–5 días			
Características del sensor: High Resolution Visible (HRV)				
Banda	Nombre	Longitud de onda (μm)	Resolución espacial (m)	
Banda 1	Verde (V)	0,50 – 0,59	10	
Banda 2	Rojo (R)	0,61 – 0,68	10	
Banda 3	Infrarrojo cercano (NIR)	0,78 – 0,89	10	
Banda 4	Infrarrojo reflejado (SWIR)	1,58 – 1,75	20	
Banda PAN	Pancrómica (PAN)	0,48 – 0,71	2,5	

Las adquisiciones de SPOT cubren una superficie más reducida que las imágenes Landsat, siendo necesarias un total de 6 escenas para cubrir la zona de estudio (Figura 12). Este factor redundará en un coste por unidad de superficie muy superior a Landsat, lo que unido a la incertidumbre asociada al proceso de adquisición bajo programación ha motivado la adquisición de una única cobertura anual dentro del PNT.

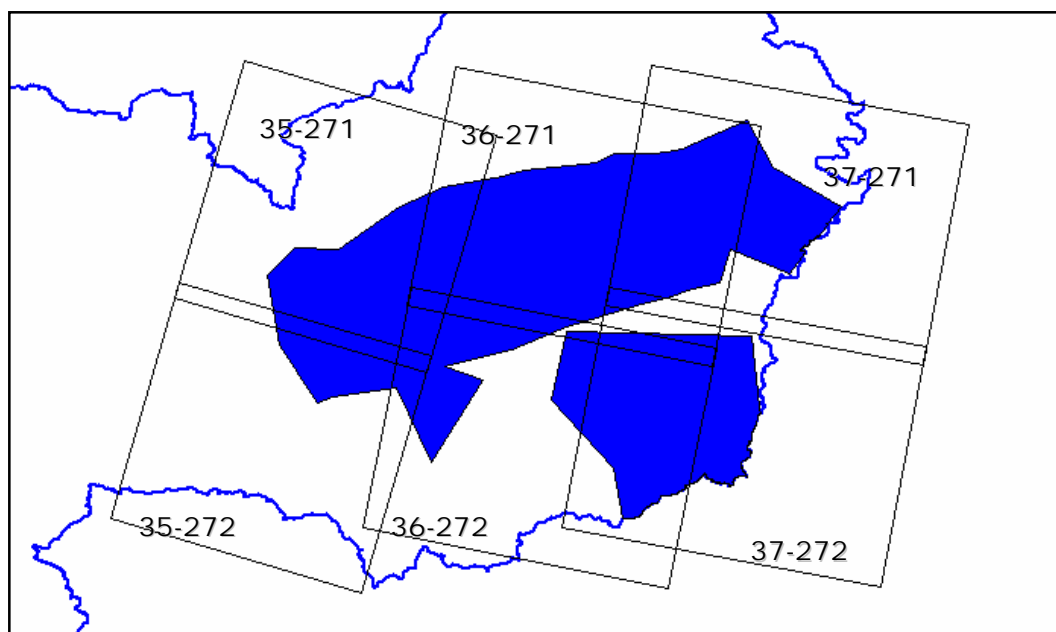


Figura 12. Localización de la zona de estudio en el sistema de referencia SPOT.

La adquisición conjunta de series de imágenes Landsat y una cobertura SPOT anual (ver Tabla 14) de mayor resolución permite una aproximación sinérgica a los procesos de extracción de información en la que se combinan las capacidades de resolución temporal y espacial de ambos satélites.

Tabla 14. Imágenes adquiridas del satélite SPOT

AÑO	Fecha de adquisición de cada escena					
	35-271	35-272	36-271	36-272	37-271	37-272
2008	19/07/2008	25/08/2008	21/08/2008	21/08/2008	31/07/2008	31/07/2008
2009	17/05/2009	17/05/2009	29/05/2009	29/05/2009	03/06/2009	03/06/2009

Como se puede observar, la cobertura SPOT de 2008 fue adquirida durante el verano, mientras que la del año 2009 se tomó durante la primavera.

### 3.3.1.3. Imágenes de satélite de años anteriores

Además de las imágenes de satélite correspondientes a los años 2008 y 2009, se ha usado un importante conjunto de imágenes de satélite de años anteriores disponibles en el archivo digital de la Comisaría de Aguas de la CHG (ver Tabla 15).

Este conjunto de imágenes ha sido utilizado para la elaboración de mapas de apoyo en diversas fases de la metodología propuesta.

Tabla 15. Recopilación de imágenes de satélite de años anteriores

IMÁGENES LANDSAT						
AÑO	Escena 200-33			Escena 201-33		
1984	24/06/1984, 10/07/1984, 28/09/1984			17/07/1984		
1985	11/06/1985, 13/07/1985, 14/08/1985			21/08/1985		
1986	14/06/1986, 16/07/1986			21/06/1986, 08/08/1986		
1987	05/09/1987			26/07/1987		
1988	21/07/1988, 22/08/1988			13/08/1988		
1989	24/07/1989			15/07/1989		
1990	12/08/1990			04/09/1990		
1991	28/06/1991, 14/07/1991, 15/08/1991			21/07/1991		
1992	17/08/1992			23/07/1992		
1993	19/07/1993			11/08/1993		
1994	07/08/1994			29/07/1994		
1995	26/08/1995			16/07/1995		
1996	11/07/1996			18/07/1996		
1997	15/08/1997			07/09/1997		
1998	17/07/1998			24/07/1998		
1999	20/07/1999, 29/08/1999					
2000	28/06/2000, 14/07/2000, 15/08/2000			27/06/2000, 14/08/2000		
2001	26/06/2001, 17/07/2001, 10/08/2001			17/08/2001		
2002	18/06/2002, 04/07/2002, 05/08/2002			12/08/2002		
2003	29/06/2003, 31/07/2003			07/08/2003		
2004	01/07/2004, 18/08/2004			22/06/2004		
2005	18/06/2005, 21/08/2005			28/08/2005		
2006	08/04/2006, 08/08/2006			30/07/2006		
2007	07/05/2007, 24/06/2007, 26/07/2007, 11/08/2007			17/08/2007		
IMÁGENES SPOT						
AÑO	35-271	35-272	36-271	36-272	37-271	37-272
2005	17/06/2005	24/08/2005	25/08/2005	18/06/2005	13/07/2005	15/08/2005
2006	23/07/2006	23/07/2006	24/07/2006	28/07/2006	24/07/2006	24/07/2006
2007	02/11/2007	02/11/2007	02/09/2007	02/09/2007	01/09/2007	01/09/2007

#### 3.3.1.4. Ortofotografía aérea

Se ha recopilado ortofotografía aérea del año 2006, como base para la determinación de la distribución del viñedo y apoyo en procesos de adecuación de otros datos geográficos. La ortofoto utilizada ha sido la generada en el año 2006 dentro del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). La fotografía es en color, cubre la totalidad del área de estudio y cuenta con una resolución espacial de 0,5 metros.

### 3.3.1.5. Vuelo multiespectral de muy alta resolución

Los cultivos leñosos presentan características de plantación que dificultan el empleo de imágenes de satélite para su discriminación y análisis, debido a su reducida fracción de cubierta vegetal sobre el terreno. Por este motivo, la respuesta registrada en las imágenes de satélite de alta resolución (dentro de las que se incluyen Landsat y SPOT XS) resulta una mezcla entre la reflectividad producida por el suelo y la aportada por las propias plantas, que queda parcialmente enmascarada.

No obstante, en los últimos años han aparecido sensores tanto a bordo de satélite como de plataformas aéreas que permiten la obtención de información multiespectral (en los rangos del visible e infrarrojo) con resoluciones espaciales mucho mayores.

Dentro del presente estudio, se ha empleado un vuelo multiespectral que fue realizado durante 2009 para la Comisaría de Aguas de la CHG con objeto de analizar su potencial como fuente de datos para la discriminación de viña en regadío.

El diseño de vuelo propuesto cubre tres zonas repartidas de este a oeste sobre el acuífero de La Mancha Occidental, y que son representativas de las diferentes tipologías y densidades de riego del viñedo dentro del perímetro de sobreexplotación.

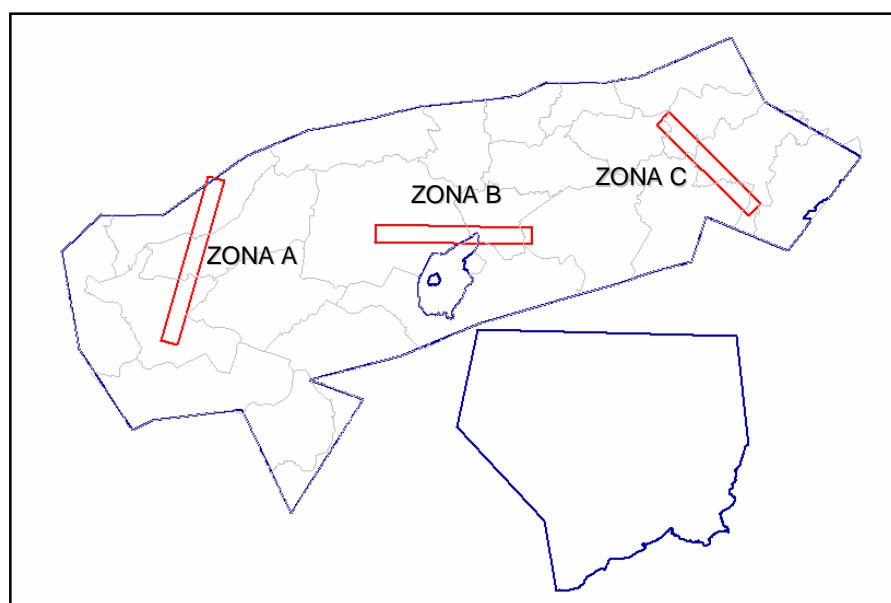


Figura 13 Localización de las zonas voladas con la cámara multiespectral ADS40.

La zona A, se sitúa a caballo entre los municipios de Villarrubia de los Ojos y Daimiel, y sigue un transecto de norte a sur en el cual la densidad de explotaciones en regadío va aumentando según nos vamos acercando desde el borde del acuífero hasta el núcleo urbano de Daimiel.

La zona B, se sitúa en la zona central del acuífero y cubre el área donde la densidad de explotaciones en regadío resulta mayor dentro del acuífero de La Mancha Occidental.

Por último, la zona C cubre áreas de la zona este del acuífero con densidad apreciable de viñedo y características variadas de accesibilidad al agua y uso de riego en el viñedo.

La zona volada cubre algo más de 24.000 hectáreas, con superficies similares para cada una de las tres zonas. La fecha de realización del vuelo fue el 21 de agosto de 2009, coincidente con un momento donde los efectos del riego deberían observarse en el estado de las plantas, después de haber soportado un verano seco y de elevadas temperaturas.

La resolución espacial de los datos tomados es de 25 centímetros para cuatro bandas multiespectrales tomadas en los rangos del visible (azul, verde y rojo) e infrarrojo próximo.

Entre los tipos de cámaras multiespectrales disponibles, se puede distinguir entre sensores de barrido y cámaras de *frames* o escenas. Los primeros sensores toman datos del territorio siempre bajo un mismo ángulo de observación, lo cual resulta preferible para cultivos leñosos que presentan una cierta altura sobre el suelo y que pueden presentar zonas en sombra e iluminadas directamente al mismo tiempo. Las cámaras de escenas capturan fotogramas con solape entre sí, que deben unirse posteriormente. Este tipo de sensores presenta un problema crítico para el caso de la viña, ya que las diferencias de iluminación entre parcelas situadas por delante y por detrás del sensor en función de su dirección de avance, puede motivar que en algunos casos se observe la cara de la viña en sombra, mientras que en otros se toman datos de las caras iluminadas, lo que introduce un factor de variabilidad que perjudica la calidad de los resultados.

La cámara utilizada en el vuelo multiespectral ha sido el modelo ADS40 (Airborne Digital Scanner) de Leica, que pertenece a la familia de los sensores de barrido, lo cual resulta óptimo para adquirir datos relativos al viñedo. Este sensor realiza un barrido continuo del terreno, registrando datos de energía reflejada desde un mismo punto en vista nadiral y posterior. Presenta un campo de visión (IFOV) de 64° y registra los datos a partir de 4 CCDs multiespectrales de 12.000 píxeles y 3 CCDs pancromáticos de 24.000 píxeles, con una distancia focal de 62,77 mm.

La capacidad de discriminación de la vegetación es muy elevada, siendo además posible la identificación de sistemas de conducción y de elementos característicos de la presencia de riego, como hierbas asociadas a la presencia de goteros, o la humedad en el suelo producida tras el uso de los aspersores.

En la Figura 14, se recoge un ejemplo visual de las imágenes obtenidas, presentada como una composición en color infrarrojo.

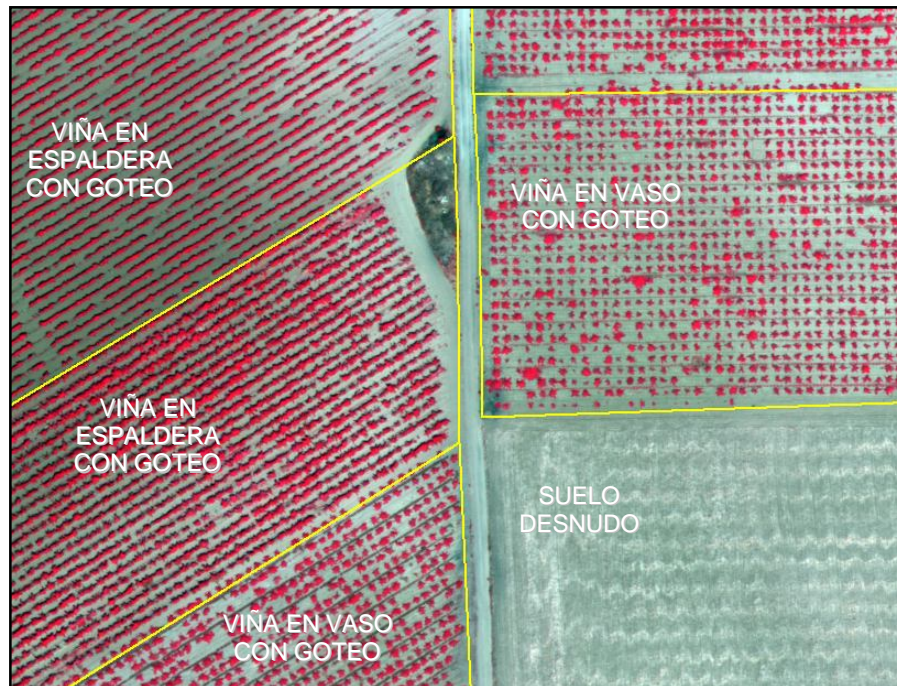


Figura 14. Ejemplo de imagen multiespectral a 25 cm sobre parcelas de viñedo. Localización de las zonas voladas con la cámara multiespectral ADS40. La presencia de los goteos se aprecia por la aparición de líneas negras, indicativas de humedad en el terreno, colocadas cada dos filas de viñedo.

### 3.3.2. Preproceso de las imágenes

Las imágenes originales adquiridas han sido sometidas a diferentes procesos con objeto de transformarlas en datos operativos y preparados para su uso en el proceso de extracción de información temática.

Dado que muchas de estas tareas resultan necesarias y básicas en cualquier trabajo de teledetección, y son tratadas en profundidad en cualquier manual básico, los procesos no se describen en detalle, sino de forma genérica.

En primer lugar, las imágenes originales adquiridas han sido sometidas a un control de calidad estricto, en el que se han contemplado los siguientes criterios:

- Localización y fecha correcta de la imagen adquirida.
- Radiometría adecuada.
- Cobertura nubosa reducida o fuera del ámbito de estudio.
- Ausencia de líneas y píxeles perdidos o en mal estado.

La información que miden los sensores a bordo de los satélites, se ve influida por factores variables tales como la posición solar, la dispersión sufrida por la luz reflejada al atravesar la atmósfera, o la absorción por parte de aerosoles y otras partículas. Para mejorar la calidad de los datos obtenidos (mitigando y eliminando en lo posible la



influencia de estos factores) y permitir su comparación directa, se ha realizado un proceso de corrección atmosférica sobre todas las bandas de la imagen.

La resolución radiométrica de los sensores a bordo de Landsat y SPOT es de 8 bits, lo que implica una capacidad de discriminación de 256 niveles de intensidad. Los sensores que registran la energía reflejada procedente de la superficie terrestre, en las diferentes longitudes de onda, se encuentran calibrados para cuantificar la energía incidente en estos 256 niveles digitales.

Los valores originales de las imágenes han sido transformados en valores de radiancia medida en alta atmósfera tomando como referencia los coeficientes de calibración de los sensores. Así, a cada píxel se le asigna el valor de energía medida por el sensor (en alta atmósfera) por unidad de área perpendicular a la dirección de la luz incidente, de ángulo sólido y de unidad de longitud de onda medida en la alta atmósfera ( $W/m^2 \cdot Srad \cdot micra$ ).

Durante el trayecto que recorre la radiación desde que ha sido reflejada por una superficie hasta que alcanza los sensores a bordo del satélite, interacciona con diferentes moléculas, por lo que las condiciones atmosféricas se convierten en un factor de variación. Además, hay que tener en cuenta otros factores como la cantidad total de luz solar incidente, la posición del satélite y el ángulo de observación del terreno. Por tanto, la intensidad de la respuesta medida desde una superficie con las mismas características varía dependiendo de la fecha de adquisición de imagen, por lo que resulta aconsejable transformar los valores de radiancia en alta atmósfera en valores de reflectancia del terreno. Estos valores físicos de reflectancia miden el porcentaje de radiación que es reflejado por la superficie y se consideran la unidad recomendable para el cálculo de IVs.

La reflectividad se ha calculado a partir del método de Chavez (Chavez, 1996), en el que se realiza un ajuste de la ecuación general de cálculo de la reflectividad (Ecuación 2) basada en el empleo de cuerpos de agua para medir valores de referencia:

$$\rho_k = \frac{K\pi(L_{sen,k} - L_{a,k})}{\tau_{k,o}(E_{o,k} \cos \theta_i \tau_{k,i} + E_{d,k})} \quad \text{[Ecuación 2]}$$

donde:

$\rho_k$  = Reflectividad en la banda k.

K = Distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas

$L_{sen,k}$  = Radiancia espectral recibida por el sensor en la banda k.

$L_{a,k}$  = Radiancia atmosférica debida a la dispersión en la banda k.

$\tau_{k,o}$  = Transmisividad atmosférica para el flujo ascendente en la banda k.

$E_{o,k}$  = Irradiancia solar en el techo de la atmósfera en la banda k.

$\cos \theta_i$  = Coseno del ángulo cenital del flujo incidente.

$\tau_{k,i}$  = Transmisividad atmosférica para el flujo descendente en la banda k.

$E_{d,k}$  = Irradiancia difusa atmosférica debida a la dispersión en la banda k.



Posteriormente, las diferentes imágenes han sido corregidas geométricamente para eliminar las distorsiones introducidas por el sensor en la captura de la información y para adecuarlas a una proyección cartográfica de referencia. De esta forma, los datos de satélite pueden ser integrados con otras fuentes de datos georreferenciadas. Los parámetros de la proyección de referencia empleada para todos los datos geográficos han sido: proyección UTM (*Universal Transverse Mercator*), huso 30, elipsoide Internacional de 1909 y datum Europeo de 1950.

La corrección geométrica de las imágenes de satélite Landsat originales se ha llevado a cabo mediante un polinomio de transformación de segundo orden y usando puntos de control (*GCPs, Ground Control Points*).

Para la toma de puntos de control se ha utilizado como referencia la ortofotografía digital del PNOA e imágenes multiespectrales SPOT ortocorregidas. Se han tomado entre 90 y 100 puntos de control distribuidos en el conjunto de cada escena completa, aunque con una mayor densidad dentro de la zona de estudio.

El control de calidad del proceso de toma de puntos de control se efectúa mediante un ajuste por mínimos cuadrados entre ambas coordenadas que nos permite controlar que el error medio cuadrático sea inferior a un píxel, o lo que es lo mismo que el error del ajuste quede dentro de la propia resolución espacial del dato original.

Para el caso de las imágenes SPOT, se ha realizado un proceso similar, aunque con la incorporación de un modelo digital de elevaciones con objeto de tener en cuenta la altura del terreno dentro de la definición de las ecuaciones que relacionan las coordenadas espaciales y los datos de imagen. Este ajuste permite una mejora en el posicionamiento de los datos espaciales que debe ser tenido en cuenta al trabajar con datos de muy alta resolución, debido a que las distorsiones producidas por efecto del relieve son mayores. Los puntos de control se han tomado a partir de la ortofotografía aérea, y han sido utilizados para las bandas pancromática y multiespectrales, ya que los datos originales se encontraban corregidos.

La corrección geométrica se ha realizado para todas las bandas de las distintas imágenes empleando dos métodos de remuestreo, i) usando para la interpolación un algoritmo de *convolución cúbica* que produce un suavizado que aumenta la capacidad de interpretación visual de las imágenes y ii) utilizando una interpolación *por el vecino más próximo*, con objeto de mantener los valores radiométricos originales y no introducir variaciones para los cálculos digitales posteriores. En ambos casos, el tamaño de píxel se remuestra al nominal del píxel del sensor TM de Landsat 5 (30 metros) y HRV de SPOT 5 (10 metros).

El vuelo multiespectral fue suministrado con un nivel de corrección básico que incluía el uso de un modelo digital, de las medidas de corrección inercial de la cámara y de la parametrización de la trayectoria del avión para la adecuación espacial de los datos. Con

objeto de conseguir un mejor ajuste del vuelo, se tomaron varios puntos de control a partir de ortofotografía aérea, empleándose estos puntos para la realización de una transformación afín para cada una de las pasadas.

El control de calidad del proceso de georreferenciación de las imágenes se ha realizado mediante superposición de las imágenes corregidas sobre otros datos espaciales de similar o mayor resolución espacial. Se han tomado medidas del desplazamiento existente entre la imagen corregida y la de muestra. Se han marcado todas aquellas zonas donde visualmente o mediante medición directa se observe un desplazamiento apreciable según la escala de trabajo de cada dato. En estos casos, se ha revisado y aumentado el número de puntos de control usados en la corrección, reforzando su distribución en las zonas de conflicto.

Como resultado de los procesos de corrección / ortocorrección geométrica, se han obtenido:

- Bandas corregidas por el método del vecino más próximo que han sido almacenadas para su empleo en los procesos de extracción de información temática, y
- Bandas corregidas por convolución cúbica, que han servido para la elaboración de composiciones en color infrarrojo. Las composiciones han sido elaboradas con realces lineales de imagen sobre una escala fija de valores, con objeto de obtener imágenes comparables en los procesos de análisis visual y fotointerpretación.

### **3.4. Recopilación de otros datos geográficos**

Además de las observaciones en campo y de las imágenes de satélite y avión, se han recopilado diferentes datos geográficos, empleados en diversas fases de la investigación y que abarcan la totalidad de la zona de estudio. Los datos han sido cedidos en la mayor parte de los casos por la Comisaría de Aguas de la Confederación Hidrográfica del Guadiana, salvo aquellos en que se indica su procedencia de forma expresa, y consisten en:

- Delimitación de los perímetros de sobreexplotación de La Mancha Occidental y del Campo de Montiel.
- Cartografía de los límites administrativos de los términos municipales. Se ha descargado a través de la página web del Instituto Geográfico Nacional (IGN)
- Parcelario catastral de rústica, en modo digital. Se encuentra asociado a una base de datos donde se recoge, para cada elemento gráfico, los datos de municipio y los códigos de polígono y parcela catastral.

- Base de datos del proyecto SIGPAC. A partir de su unión con la base gráfica del parcelario catastral, se ha obtenido un mapa de usos del suelo basado en los procesos de fotointerpretación desarrollados durante el proyecto SIGPAC.
- Cartografía de caminos y vías de comunicación, extraída del mapa de usos del suelo de SIGPAC.
- Red hidrológica, con la delimitación de ríos y los principales arroyos.
- Cartografía de superficies asociadas a las captaciones con concesión administrativa para el uso privativo de aguas subterráneas según el sistema Alberca.
- Cartografía de parcelas de viña donde, a partir de la fotointerpretación de fotografía aérea del año 2001, se observaron indicios relacionados con la existencia de riego.
- Inventario de pozos, elaborado a partir de trabajos en campo realizados entre 1999 y 2002.
- Hojas 1:50.000 del Mapa Topográfico Nacional, en modo digital.
- Observaciones en campo acerca de la localización de cultivos regados durante los años 2004 - 2008.
- Datos de posicionamiento de las estaciones del SIAR y datos climáticos asociados para cada estación. Todo este conjunto de información ha sido obtenido a través de la página web del SIAR (<[www.crea.uclm.es/siar](http://www.crea.uclm.es/siar)>).
- Lecturas de caudalímetros. Esta tabla de datos contiene datos de extracciones realizadas desde un conjunto de captaciones ubicadas dentro de los acuíferos sobreexplotados y un código que permite su asociación con la base gráfica de expedientes de derechos de uso adquirido para riego.



## **4. DESARROLLO METODOLÓGICO PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA DE CULTIVOS REGADOS**

El objetivo principal del presente trabajo de investigación se centra en el desarrollo de una metodología ajustada a las características del territorio y enfocada a la obtención de la distribución de los cultivos regados a lo largo de una campaña agrícola, y a la posterior estimación de la demanda hídrica de la agricultura.

Como paso previo al diseño metodológico, se ha llevado a cabo un análisis del estado del conocimiento en diferentes temas relacionados, con objeto de sentar las bases y fijar las aproximaciones más recomendables para enfrentar el problema propuesto. Dentro de esta fase, se han identificado las líneas de trabajo existentes en el uso de técnicas de teledetección en el campo de la agronomía, haciendo especial énfasis en las aplicaciones directamente relacionadas con el estudio de la extensión y características de las superficies en regadío, así como en la descripción de los trabajos realizados dentro de la Cuenca Alta del Guadiana.

Las técnicas de proceso digital de imágenes de satélite muestran un elevado potencial para la discriminación de cultivos regados, permitiendo la obtención de información georreferenciada, actualizada, cuantificada y sinóptica sobre amplios territorios. El coste de adquisición y tratamiento de los datos de Observación de la Tierra mejora a otras técnicas más convencionales, sobre todo cuando la extensión del área analizada abarca un ámbito regional.

En la Cuenca Alta del Guadiana los conflictos hídricos resultan ser acuciantes (ver apéndice A.2), por lo que la disponibilidad de información fiable y actualizada acerca de la cuantificación de las superficies regadas y su localización es una necesidad real de gestores y usuarios. En este contexto, se han realizado numerosos trabajos basados en el uso de la teledetección, aunque con divergencias en sus resultados, originadas por la utilización de diferentes metodologías.

Esta situación puede provocar cierta desconfianza acerca del potencial de las técnicas de información geográfica como herramienta para la determinación de superficies regadas. Las causas de estas diferencias son conocidas:

- La dificultad inherente a la detección de las características de los viñedos al trabajar con imágenes de satélite en las que se mezcla la respuesta procedente de suelo y vegetación. Aunque utilizando imágenes de muy alta resolución espacial resulta posible discriminar los viñedos del suelo desnudo y de las sombras de las plantas, el coste de adquisición de este tipo de datos y su tiempo de proceso, dificultan la generalización de su empleo. Así, hay que asumir que, a día de hoy, el tipo de dato que permite trabajar, de forma operativa, en una zona extensa como los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana,

muestra una respuesta mezclada para las parcelas de viñedo. Este comportamiento provoca que la cuantificación de la superficie de viñedo regada sea especialmente compleja.

- Las diferencias en las dotaciones de riego empleadas en los cultivos, especialmente considerables en el caso de los cereales y de la viña. Desde el punto de vista de la existencia de riego, se consideran dos categorías generales, cultivos regados (cuando parte de las necesidades hídricas del cultivo se cubre a través de riegos) y cultivos no regados. Dentro de los cultivos regados, existe un gradiente que abarca desde los riegos de emergencia hasta los riegos intensivos. Desde un punto de vista operativo, la detección de los riegos que implican un mayor consumo es la más importante y al mismo tiempo la más fiable. Según se reduce la dotación empleada, la dificultad de discriminación del riego resulta mayor, ya que los efectos que se ocasionan sobre el cultivo resultan menos apreciables. Así, se producen situaciones límite donde cultivos en secano, que se encuentran sobre suelos con mejores condiciones agronómicas y/o sobre los que se han aplicado tratamientos fitosanitarios y abonados, presentan mayores densidades de cosecha y un mejor aspecto general que cultivos que se han beneficiado de un riego de apoyo.

Las estimaciones de superficies regadas disponibles para los acuíferos de La Mancha Occidental y del Campo de Montiel, señalan al viñedo como el cultivo más extenso en la zona, seguido por los cereales de invierno, por lo que los dos factores comentados previamente cobran especial relevancia.

Dentro del capítulo relativo al diseño metodológico, se ha explicado como las características de los diferentes tipos de cultivos en riego y su calendario fenológico aconsejan dividir la aproximación metodológica para la elaboración del mapa de cultivos regados de acuerdo a tres grandes grupos de cultivos: herbáceos regados durante la primavera, herbáceos regados durante el verano y leñosos. Las diferentes metodologías de trabajo presentan fases comunes, consistentes en la adquisición de datos geográficos y en el diseño y realización de campañas de campo.

En todos los casos, se realiza una segmentación territorial con objeto de aplicar cada metodología, de forma separada, en zonas donde las variables agronómicas y espaciales presenten una mayor uniformidad. De esta forma, las decisiones relacionadas con la probabilidad de que una parcela se encuentre en riego, se toman siguiendo unos criterios comunes para toda la superficie dentro de cada unidad territorial. En cada una de estas zonas, se asume que las características de los cultivos son mucho menos heterogéneas que en el conjunto del acuífero. La toma de datos de campo ha sido significativa y representativa para cada unidad, por lo que los criterios establecidos para la toma de decisiones, en base a estas observaciones, se consideran extrapolables.

El desarrollo metodológico comparte una aproximación similar para los tres grupos de cultivos considerados, en la que se procede a la integración de datos geográficos con objeto de obtener información acerca de la distribución de cultivos regados.

En todos los casos, el desarrollo metodológico se realiza a través de cuatro fases genéricas, aunque con singularidades propias para cada grupo de cultivos contemplado:

- i) En primer lugar, se procede a la segmentación de las parcelas de interés, de forma que el proceso de discriminación de la existencia de riego o de la identificación de tipos de cultivos se limita, en cada caso, a un conjunto diferente de parcelas agrícolas ocupadas por los cultivos de referencia.
- ii) En segundo lugar, se definen criterios relacionados con la probabilidad de existencia de riego o con la identificación de cultivos. Estos criterios de aptitud se crean en forma de mapas que toman valores para todas las parcelas extraídas en el proceso previo de segmentación.
- iii) Los mapas de aptitud conforman la base para la caracterización de la probabilidad de existencia de riego o de la tipología de cultivos, a través de un enfoque de integración de criterios.
- iv) Por último, la disponibilidad de muestra de campo sirve como apoyo para el proceso de toma de decisión asociado a la identificación de tipos de cultivos o de la existencia de riego.

En la Tabla 16, se describe la relación entre las fases generales del desarrollo metodológico y las fases particulares de cada una de las tres aproximaciones elaboradas según grupo de cultivo. Las distintas metodologías presentan diferencias muy notables en su concepción y aplicación, derivadas de la variabilidad de casuísticas abordadas, y de la idiosincrasia y características propias de la discriminación de la existencia de riego en cada cultivo. No obstante, todas las aproximaciones realizadas comparten diversos rasgos:

- Como primer paso, identifican el conjunto de parcelas donde aparecen los cultivos.
- Analizan la presencia de riego a partir de datos multiespectrales, territoriales y administrativos en un contexto multitemporal. La integración de los datos emplea un enfoque multicriterio.
- Los datos de campo sirven como apoyo fundamental para la asignación de categorías de cultivo o la identificación de la presencia de riego.

Tabla 16. Relación entre las fases generales de la metodología y los procesos en que se dividen las aproximaciones metodológicas para los diferentes grupos de cultivos

TIPO DE CULTIVO		
HERBÁCEOS DE VERANO	HERBÁCEOS DE PRIMAVERA	VIÑEDO
<b>FASE 1.- Segmentación de parcelas</b>		
Elaboración del mapa de superficie regada (apartado 4.1.2.)	Delimitación de parcelas cultivadas en primavera (en la introducción del apartado 4.2);  Discriminación de ajo en regadío (apartado 4.2.1.) y  Discriminación de leguminosas en regadío (apartado 4.2.2.)	Elaboración del mapa de distribución del viñedo (apartado 4.3.1.)
<b>FASE 2.- Definición de criterios de aptitud (enfoque multiespectral y multitemporal)</b>		
Análisis visual de la respuesta espectral de los cultivos en regadío (apartado 4.1.1.)	Criterios para determinar la existencia de riego en el cereal (apartado 4.2.3.2.)	Definición de criterios (apartado 4.3.2.1.) y  Asignación de valores a los criterios (apartado 4.3.2.2.)
<b>FASE 3.- Caracterización de la probabilidad de existencia de riego o de tipos de cultivos (enfoque multicriterio)</b>		
Fotointerpretación asistida (apartado 4.1.3.1.) y  Clasificación multiespectral (apartado 4.1.3.2.)	Sistema de decisión basado en el historial de riego de cada parcela (en el apartado 4.2.3.2.)	Combinación de los criterios para la elaboración de un mapa de probabilidad de la presencia de riego (apartado 4.3.2.3.)
<b>FASE 4.- Identificación de la presencia de riego o de tipos de cultivos</b>		
Integración de resultados mediante un árbol jerárquico de decisión (apartado 4.1.3.3.)	Determinación de umbrales para la definición de mapas de cereal regado (en el apartado 4.2.3.3.)	Determinación de umbrales para la definición de mapas de viña regada (apartado 4.3.2.5.)

Partiendo de esta base, en los siguientes apartados se describen, de forma sucesiva, los tres desarrollos metodológicos planteados para la determinación de la distribución de los distintos tipos de cultivos regados dentro de los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana.



#### 4.1. Distribución de cultivos herbáceos regados en verano

La metodología propuesta para la elaboración del mapa digital de cultivos herbáceos regados durante el verano y otoño de 2009, en los acuíferos de La Mancha Occidental y Campo de Montiel, se basa en el proceso digital de imágenes multiespectrales de primavera, verano y otoño de los satélites Landsat y SPOT. La obtención de información temática se consigue a partir de un análisis en el que se integran técnicas de clasificación multiespectral y de fotointerpretación asistida, tomando como referencia la “*verdad terreno*” recogida en la campaña de campo.

Durante el verano, la determinación de la presencia de riego resulta prácticamente asimilable a la observación de la presencia del cultivo. Dadas las condiciones semiáridas (ver apéndice A.1.2.2) y el carácter continental – mediterráneo del clima de la zona, los veranos se asocian con periodos de fuerte estiaje e intensa evapotranspiración, por lo que la casi totalidad de los cultivos herbáceos cuyo máximo desarrollo coincide con este periodo son regados para asegurar su supervivencia.

De acuerdo con las observaciones realizadas en las campañas de campo, la única excepción a esta situación es el girasol, que aparece tanto en riego como en secano, en este último caso con una distribución restringida al noreste de la zona de estudio, coincidente con zonas de mayor altitud y precipitación media (ver apéndice, figura A.3).

La existencia de cultivos herbáceos regados introduce un elemento de fuerte contraste dentro del paisaje estival manchego. Las superficies regadas producen cubiertas vegetales densas de aspecto llamativo dentro del predominio de viñedos, rastrojos de cereales, barbechos y terrenos baldíos.

El efecto del riego intensivo sobre los cultivos permite que este tipo de superficies sean discriminables. Los aportes regulares de riego evitan que el agua se convierta en un factor limitante para los cultivos, lo que permite que sean plantados en densidades altas y que presenten fuertes crecimientos favorecidos por el elevado número diario de horas de luz solar.

El contraste entre las superficies regadas y otras cubiertas predominantes facilita su identificación a partir de datos de Observación de la Tierra, ya que las imágenes multiespectrales registran datos relacionados con la densidad, vigor y humedad de la vegetación. De forma general, las bandas de mayor utilidad son aquellas que recogen la radiación en longitudes de onda coincidentes con las zonas de máxima absorción de los pigmentos fotosintéticos (clorofila, carotenos y xantofilas), aquellas donde se maximiza la absorción de la radiación por parte del agua y las bandas que operan en la región del infrarrojo próximo (donde la reflexión producida por la vegetación resulta muy superior a otras regiones del espectro).

Así, las parcelas regadas se discriminan con nitidez a partir las imágenes adquiridas durante el verano, para lo que se han elaborado composiciones en color infrarrojo a partir de la combinación en una sola imagen de las bandas del infrarrojo próximo, infrarrojo medio y rojo visible. Según esta combinación en color:

- Las superficies de cultivos en regadío aparecen en tonos rojos, magentas y rosas, correspondientes a la gama de colores donde el ojo humano tiene una mayor discriminación.
- Las superficies ocupadas por vegetación natural se observan en tonos verdosos.
- Las zonas arboladas y de monte bajo se aprecian en colores verdes oscuros.
- Las superficies de rastrojo y suelos desnudos aparecen en color gris o blanco.

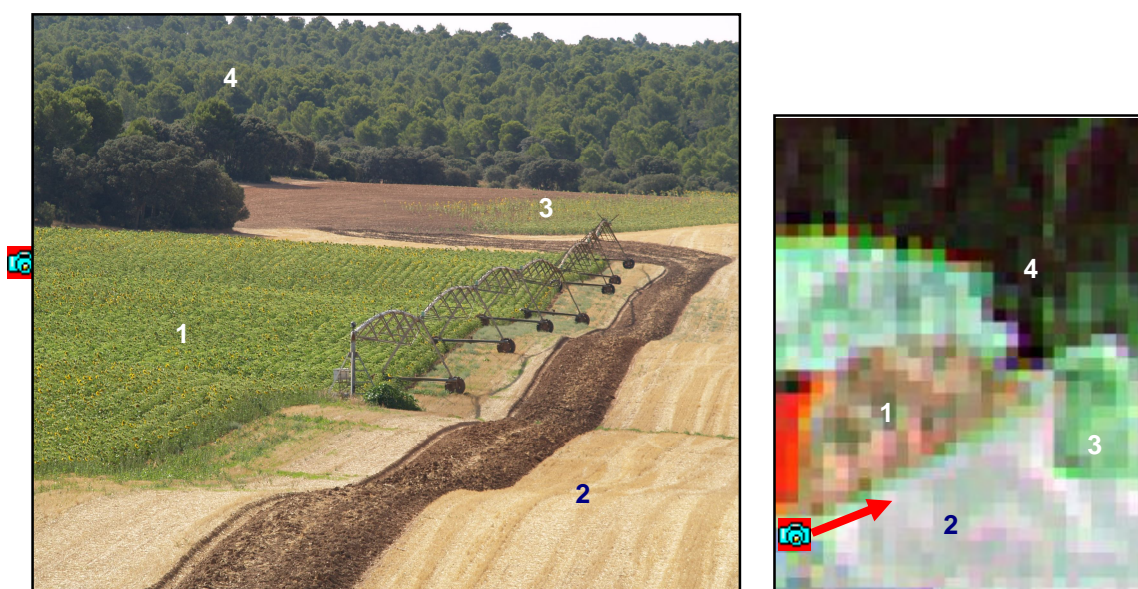


Figura 15. Composición en color infrarrojo a partir de una imagen Landsat y fotografía de diferentes tipos de cubiertas: herbáceo regado, cereal cosechado, vegetación en barbecho y bosque.

#### 4.1.1. Análisis visual de la respuesta espectral de los cultivos en regadío

Con objeto de comprobar la capacidad de las imágenes empleadas para la identificación de cultivos, así como detectar rasgos propios de cada tipo de cultivo, se ha analizado la evolución de la respuesta de los principales cultivos regados durante el verano. Para ello, se han elaborado composiciones en color infrarrojo para todas las imágenes disponibles, usando las bandas corregidas radiométricamente y empleando valores constantes en los procesos de realce, basados en expansiones lineales del histograma.

A partir de un amplio número de muestras identificadas en campo, se ha analizado el comportamiento y evolución fenológica de los principales cultivos en la serie completa de imágenes en color infrarrojo. Como resultado, se ha obtenido información relacionada con la evolución temporal de la respuesta espectral de los diferentes tipos de cultivos y con la

existencia de prácticas agronómicas que ayuden a su identificación. Este análisis ha permitido un mejor ajuste del diseño metodológico para la elaboración del mapa de cultivos herbáceos regados en verano.

En las siguientes figuras se recoge una síntesis con las principales observaciones realizadas sobre parcelas de cultivos identificadas durante la campaña de campo. Se ha optado por preponderar el aspecto gráfico sobre un mayor desarrollo de los comentarios escritos, ya que en este caso, las imágenes y figuras son la mejor vía para transmitir las apreciaciones realizadas. De acuerdo con la leyenda temática propuesta (apartado 3.1) y los resultados de la campaña de campo, las categorías de cultivos consideradas de mayor interés son alfalfa, cebolla, girasol, maíz, melón o sandía, patata, pimiento o tomate y remolacha.

Dentro de cada figura se incluye una descripción de la evolución fenológica del cultivo, varias imágenes en color infrarrojo que muestran la respuesta característica del cultivo a lo largo de cada campaña y por último, gráficos temporales del coeficiente de cultivo  $k_c^7$ , que se encuentran relacionados con la fracción de cubierta vegetal de cada cultivo y por tanto, con los valores que son registrados en los índices de vegetación calculados para cada fecha.

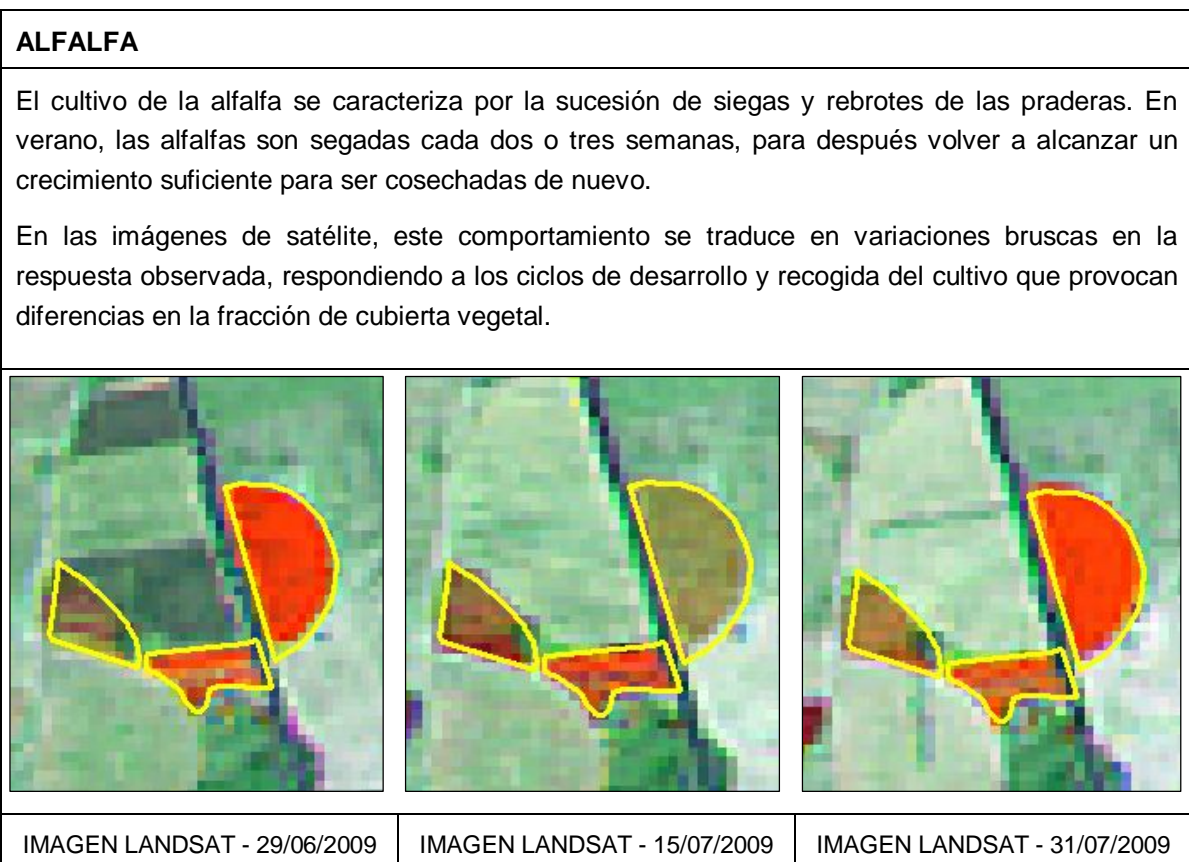


Figura 16. Identificación de parcelas cultivadas de alfalfa

<sup>7</sup> Los datos necesarios para la elaboración de estas gráficas han sido tomados de (FAO, 2006)

## CEBOLLA

La cebolla es un cultivo con baja fracción de cubierta vegetal (en torno a un 40% de máximo), lo que se refleja en el color observado en las imágenes, que se aleja de los tonos rojos propios de los cultivos de alta densidad. Por otro lado, la humedad del suelo, necesaria para el engrosamiento del bulbo, queda reflejada en las bandas infrarrojas en tonos oscuros.

Así, los colores que representan las parcelas ocupadas por cebollas, en su etapa de máximo desarrollo, se acercan más a los colores magentas y granates, que a los rojos.

Las imágenes de primavera también pueden aportar información de interés, sobre todo por el efecto de alternancia en el color del suelo que producen los riegos por aspersión o goteo móvil. Las zonas donde se está produciendo el riego o donde éste se ha aplicado en los últimos días, se observan en colores más oscuros, derivados del elevado contenido en humedad o incluso del encharcamiento de los suelos.

En las imágenes de agosto, el cultivo se encuentra ya en su fase de senescencia, observándose en tonos rosas que denotan una menor humedad y actividad de las plantas.



IMAGEN SPOT - 29/05/2009



IMAGEN LANDSAT - 29/06/2009



IMAGEN LANDSAT - 16/08/2009

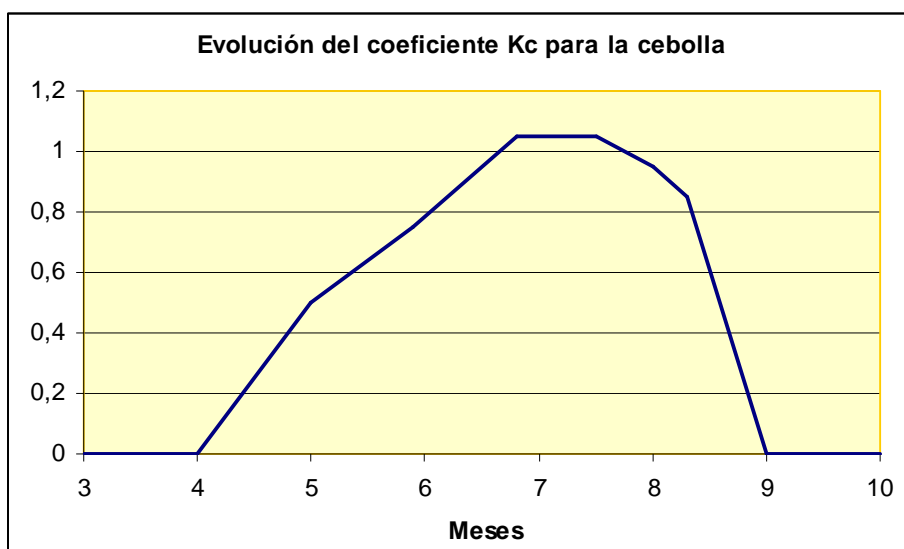


Figura 17. Identificación de parcelas cultivadas de cebolla



**GIRASOL**

El girasol resulta más frecuente en secano que en regadío, sobre todo en la zona este del acuífero de La Mancha Occidental. El riego se produce en muchas ocasiones en explotaciones de tamaño medio o alto, y se realiza mediante sistemas de pivot o aspersión.

Se trata de un cultivo que presenta una respuesta que se prolonga durante todo el verano, pero que nunca llega a ser muy intensa, debido a que su fracción de cubierta vegetal es reducida en relación a otros cultivos regados. Por ello los colores en los que se aprecia su respuesta oscilan entre tonos naranjas y encarnados.

El girasol en riego no resulta un cultivo demasiado extendido dentro de la zona de estudio.

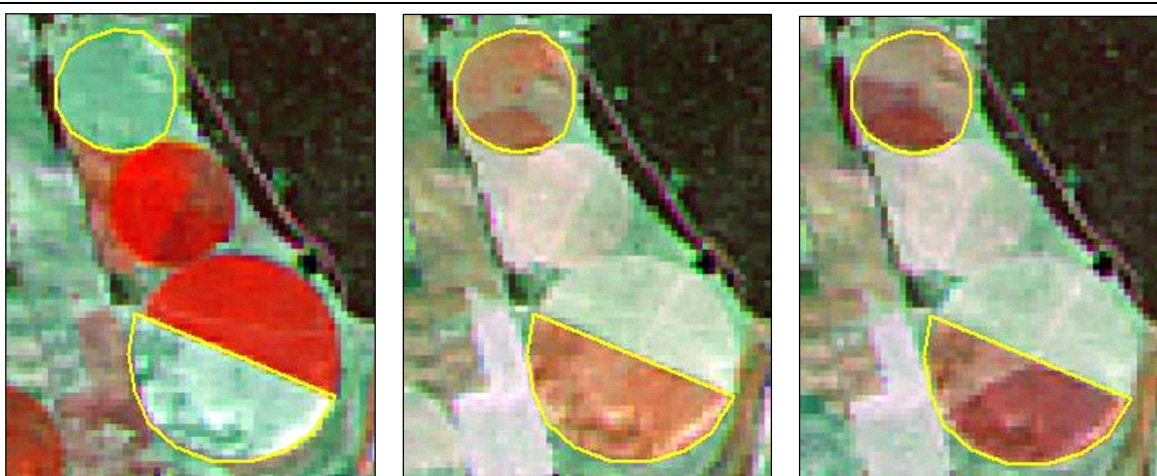


IMAGEN LANDSAT - 28/05/2009

IMAGEN LANDSAT - 31/07/2009

IMAGEN LANDSAT - 16/08/2009

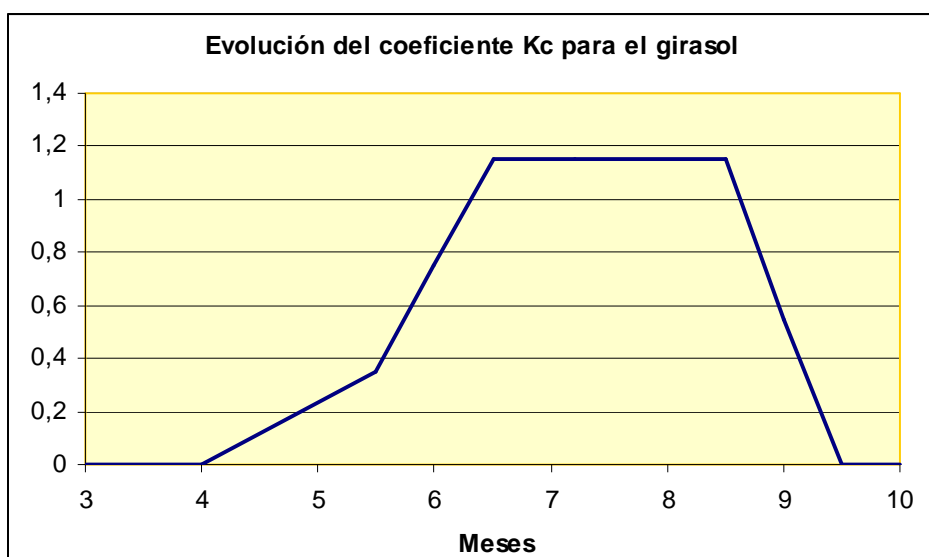


Figura 18. Identificación de parcelas cultivadas de girasol

## MAÍZ

El maíz presenta una elevada cubierta vegetal sobre el suelo que se mantiene durante la totalidad del verano. En su fase de crecimiento (durante el mes de junio), la respuesta apreciada resulta más débil, aunque en poco tiempo el cultivo alcanza su máxima densidad. Durante los meses de julio y agosto, muestran una elevada respuesta que se plasma en tonos rojos intensos.

Hasta la entrada del mes de septiembre, el cultivo no comienza a mostrar signos de agostamiento, secándose durante este mes y siendo cosechado durante el comienzo del otoño.

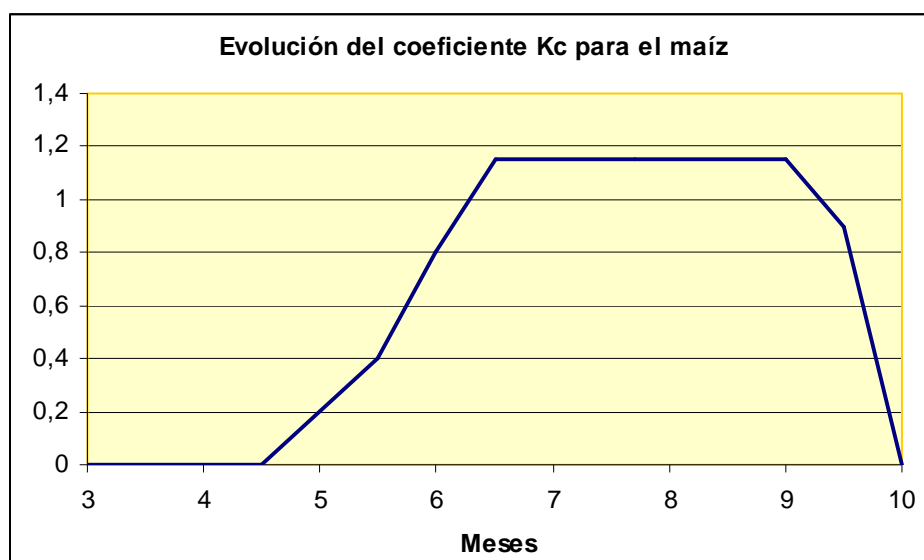
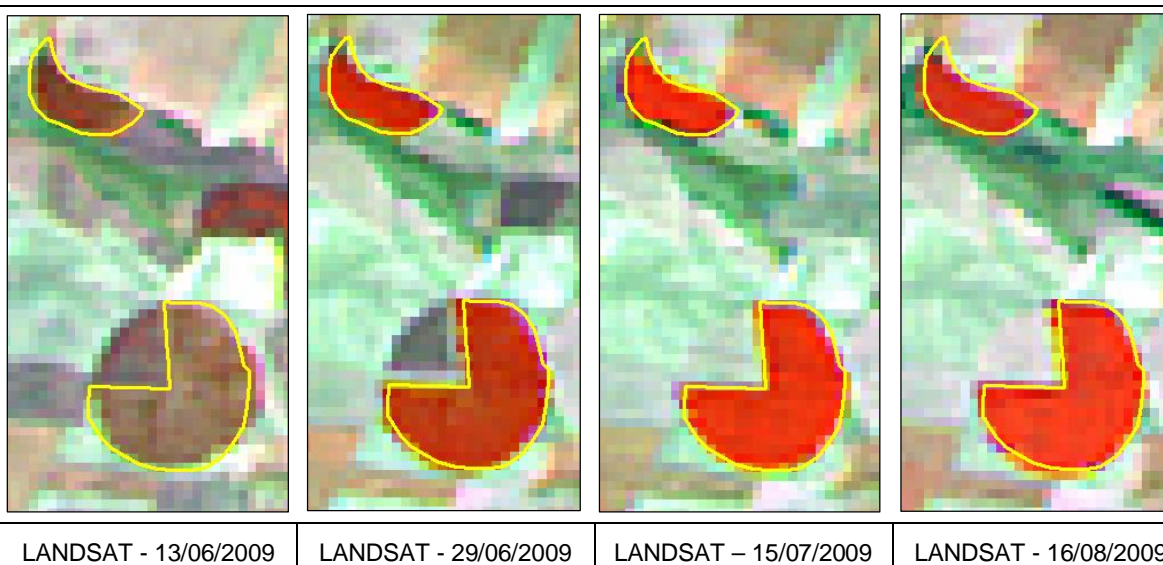


Figura 19. Identificación de parcelas cultivadas de maíz

**MELÓN / SANDÍA**

En esta categoría se agrupa la familia de las solanáceas, representadas principalmente por el melón, y en menor medida por la sandía. Son los más frecuentes entre los herbáceos regados durante el verano dentro la Cuenca Alta del Guadiana.

Estos cultivos presentan una elevada heterogeneidad en cuanto a su ciclo fenológico. Por motivos relacionados con la gestión de las prácticas agrarias, de la recogida y del almacenamiento y puesta en mercado del producto, resulta frecuente que dentro de una misma explotación, se planten melones y sandías en diferentes fechas, presentando una diferencia secuencial en su estado de desarrollo a lo largo de la campaña. Dado que los melones y sandías se plantan en filas cubiertas de plástico, cada plantación suele cubrir franjas alargadas dentro de las parcelas, formadas por varias tiras de plantas. Esta alternancia de franjas con cultivos en diferente fase de desarrollo fenológico resulta característica.



IMAGEN SPOT - 17/05/2009

IMAGEN LANDSAT - 15/07/2009

IMAGEN LANDSAT - 16/08/2009



Tanto el melón como la sandía, dentro de la zona de estudio, se suelen encontrar bajo una cubierta de plástico blanco durante sus fases inicial y de desarrollo. Los plásticos, aunque cubren solo una parte reducida de la parcela, presentan una respuesta caracterizada por su elevado brillo, apareciendo en tonos grises metálicos dentro de las composiciones en color infrarrojo.

En las fases más incipientes de desarrollo la respuesta del cultivo viene determinada por la presencia de los plásticos. Una vez que las plantas alcanzan un desarrollo suficiente para romperlos, o permitir que éstos sean retirados, comienza a ser visible la respuesta producida por la presencia de la vegetación, aunque ésta resulta débil en comparación con la producida por otros cultivos regados. Durante esta fase de desarrollo del cultivo, la señal que recogen los sensores contiene una mezcla entre vegetación y suelo desnudo. A medida que va aumentando la fracción de cubierta vegetal del cultivo sobre el terreno, la presencia de vegetación va cobrando un mayor protagonismo en la respuesta global del cultivo, hasta que llega a alcanzar valores propios de cubiertas densas.

Figura 20. Identificación de parcelas cultivadas de melón y sandía

### PATATA

La patata suele aparecer en parcelas pequeñas, presenta un cambio brusco desde su fase inicial a la de desarrollo máximo, que suele producirse durante el principio del verano, y muestra una respuesta característica una vez que el terreno ha sido removido para su recogida.

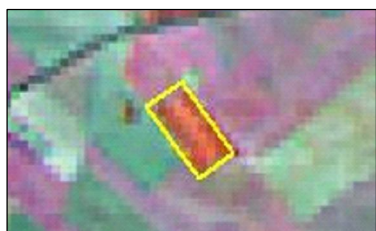


IMAGEN LANDSAT - 28/05/2009

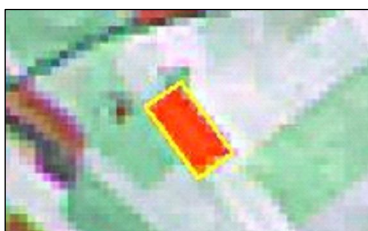


IMAGEN LANDSAT - 29/06/2009

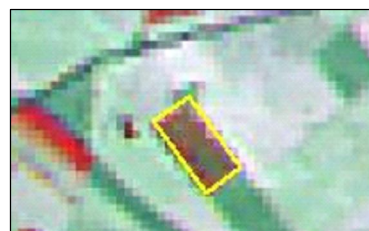


IMAGEN LANDSAT - 16/08/2009

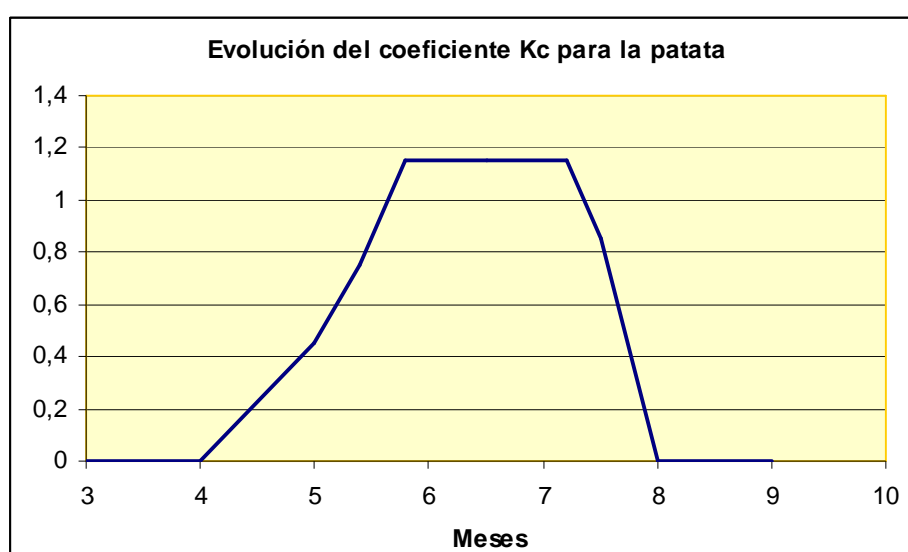


Figura 21. Identificación de parcelas cultivadas de patata



**PIMIENTO / TOMATE**

En esta categoría se agrupa la familia de las cucurbitáceas, representadas principalmente por el pimiento, y en menor medida por el tomate. También se ha observado la presencia de algunos cultivos de calabacín y berenjena.

En general, dentro de la zona de estudio, estos cultivos se encuentran, al igual que el melón, bajo una cubierta de plástico durante sus fases inicial y de desarrollo. El plástico usado es en casi todas las ocasiones de color negro, lo que produce una respuesta diferente, representada por colores verdes oscuros.



En su fase de máximo desarrollo foliar, estos cultivos no muestran una respuesta demasiado significativa, ya que crecen en matas con un mayor extensión vertical que horizontal, por lo que no llegan a cubrir totalmente el suelo. Se observa la presencia de la vegetación durante todo el verano, aunque en forma de tonos apagados.

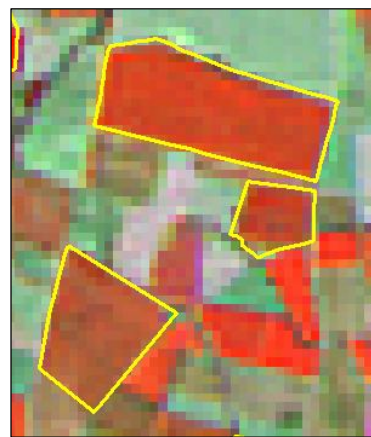
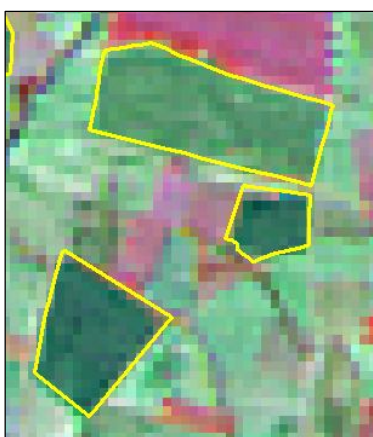


IMAGEN LANDSAT - 28/05/2009

IMAGEN LANDSAT - 15/07/2009

IMAGEN LANDSAT - 01/09/2009

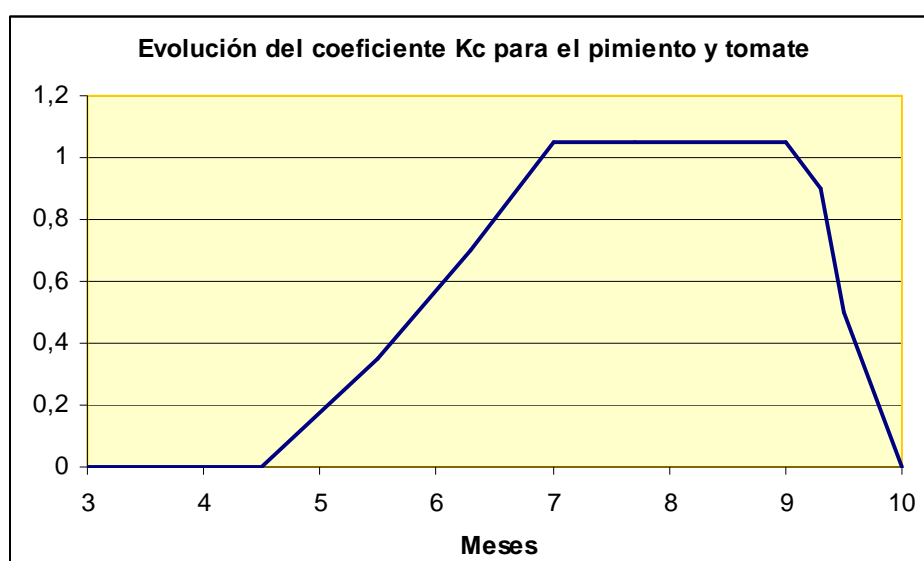


Figura 22. Identificación de parcelas cultivadas de pimiento o tomate

**REMOLACHA**

Se trata de un cultivo, que hace no demasiado tiempo, ocupaba grandes extensiones en la Llanura Manchega, pero que en la actualidad, tras el cierre de varias plantas azucareras, ha quedado relegado a un papel casi testimonial.

Presenta una elevada cubierta sobre el terreno y su fase de máximo desarrollo foliar coincide con la totalidad del verano y parte del otoño. Por este motivo su respuesta en las imágenes resulta intensa a lo largo de toda la serie disponible.

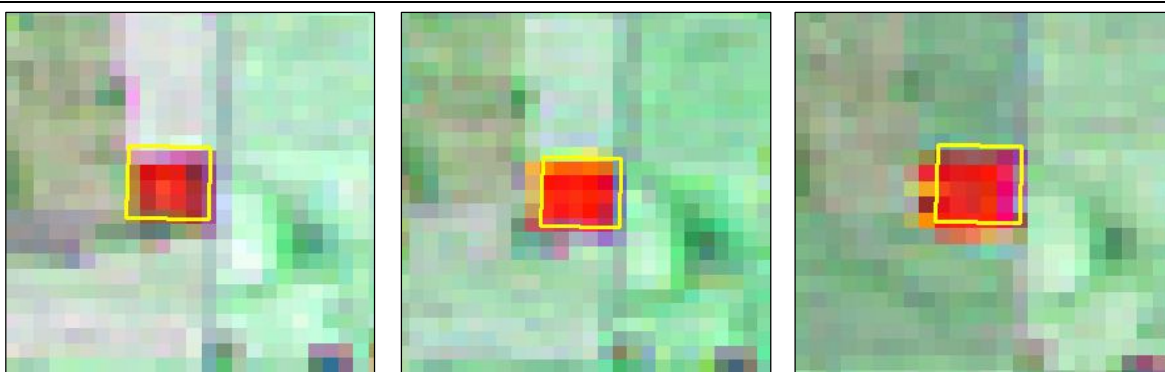


IMAGEN LANDSAT – 13/06/2009

IMAGEN LANDSAT - 15/07/2009

IMAGEN LANDSAT - 01/09/2009

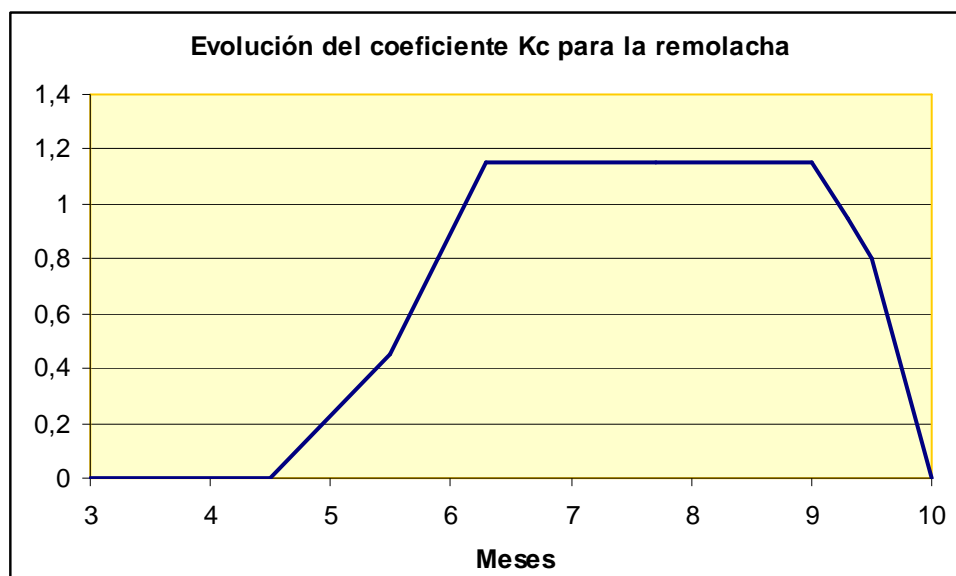


Figura 23. Identificación de parcelas cultivadas de remolacha

El análisis visual, para diferentes cultivos, a partir de la serie temporal disponible de composiciones en color infrarrojo ha servido para comprobar la validez y capacidad de la fuente de datos de partida para discriminar los diferentes cultivos herbáceos regados durante el verano en la zona de estudio. El proceso digital de las imágenes de satélite muestra un gran potencial para la identificación, delimitación y cartografía de este tipo de uso del suelo.

Como se ha comentado anteriormente, el único cultivo de tipo herbáceo que se ha observado tanto en secano como en regadío dentro de los acuíferos sobreexplotados es el girasol. La respuesta de este cultivo en las imágenes presenta grandes variaciones.

Con objeto de identificar el efecto que el riego produce sobre el cultivo, así como de caracterizar la respuesta espectral de las parcelas regadas, durante la campaña de campo de verano se hizo especial énfasis en la observación de parcelas de girasol, visitándose un gran número de explotaciones durante la segunda quincena de agosto.

El análisis conjunto de las imágenes de satélite de agosto y de los datos de campo muestra la existencia de diferencias muy importantes en la densidad, altura de plantas, verdor, apariencia y tamaño de las tortas entre las parcelas cultivadas de girasol.

La variabilidad observada en las características de este tipo de cultivos resulta muy amplia (ver Figura 24) y responde a varios factores además del propio riego.

En primer lugar, se observa que los girasoles en riego son cultivos de gran densidad y altura, que no muestran signos de estrés hídrico. La respuesta recogida en las imágenes de satélite se corresponde con esta descripción, encontrándose en órdenes de magnitud similares a la de otros cultivos herbáceos regados durante el verano. Las parcelas de girasol regadas presentan diferencias apreciables respecto a las que se cultivan en secano.

Dentro de estas últimas, las parcelas que presentan un mejor estado se han incluido en una categoría denominada “girasol de secano cuidado”. En estos cultivos, las plantas alcanzan un desarrollo adecuado y un buen aspecto general, encontrándose los cultivos limpios de malas hierbas. Parece probable que estas parcelas hayan sido convenientemente abonadas y fertilizadas, además de haber recibido algún tipo de tratamiento fitosanitario. La cubierta vegetal de este tipo de parcelas resulta suficiente como para que se aprecie en las imágenes de satélite, aunque con diferencias respecto a los girasoles en riego. Durante las visitas en campo, no se apreció ningún indicio de existencia de riego en parcelas de este tipo, por lo que se desestima la posibilidad de que se realicen riegos de apoyo en la zona sobre el girasol.

Por otro lado, también se observaron muchas parcelas de girasol prácticamente abandonadas, muy ralas, con abundante presencia de malas hierbas y escaso crecimiento, lo cual queda recogido, a su vez, en las imágenes de satélite. El rendimiento de este tipo de cultivos ha de ser muy reducido, y resulta probable que hayan sido



plantados pensando más en el cobro de subvenciones que en el posible beneficio de la hipotética cosecha.

Entre medias de ambos tipos, existe un amplio abanico de cultivos de girasol en secano, con respuesta espectral intermedia.

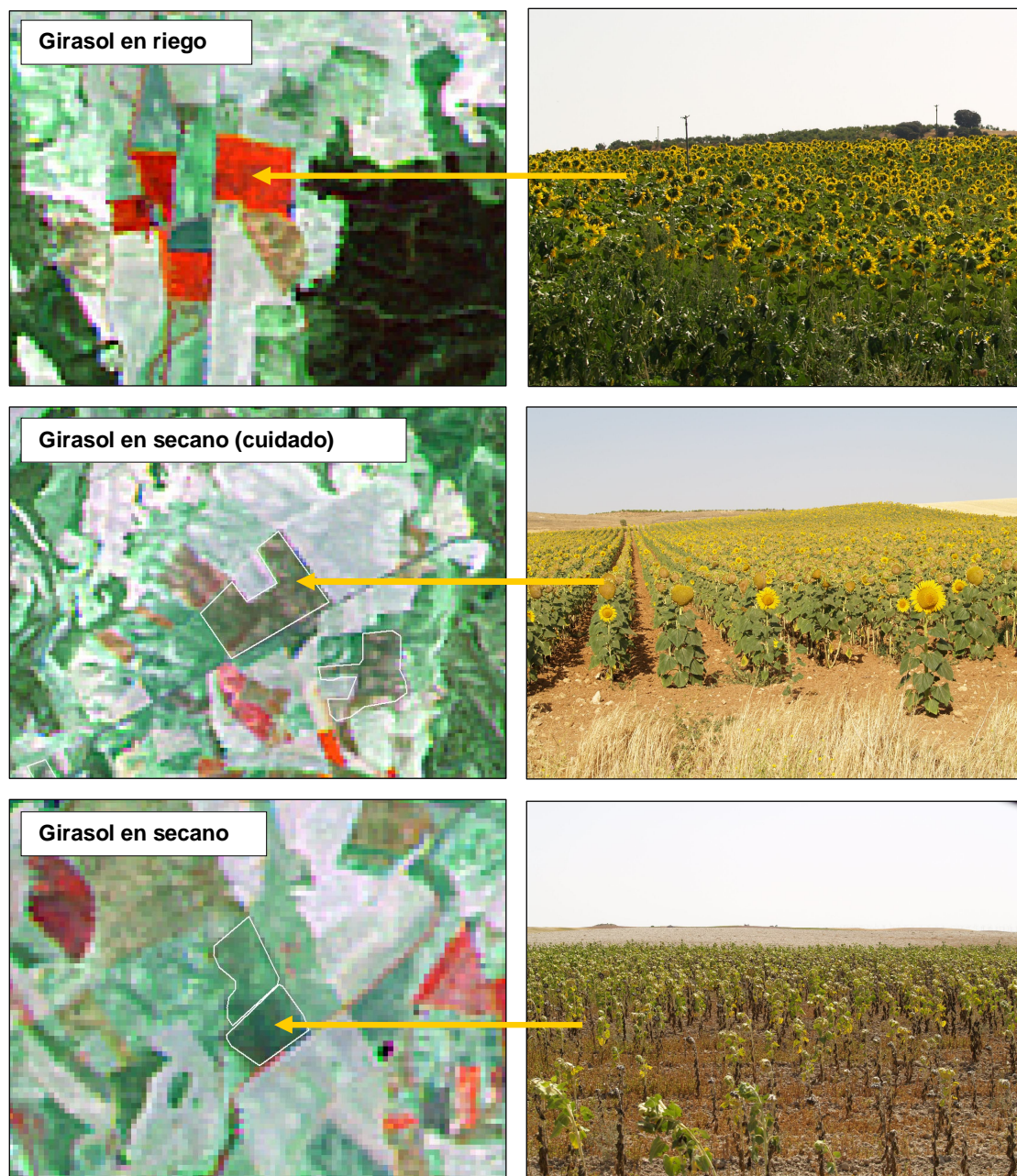


Figura 24. Ejemplos de diferentes tipologías de cultivo de girasol observadas dentro de la Llanura Manchega.

Las figuras de la parte izquierda corresponden a composiciones en color infrarrojo a partir de la imagen Landsat de 16 de agosto de 2009. En la parte derecha se observan las fotografías de esas mismas parcelas tomadas durante la visita de campo, coincidente en fecha.

#### 4.1.2. Elaboración del mapa de superficie regada

La elaboración del mapa de superficie regada supone una primera fase necesaria para la posterior obtención del mapa de cultivos herbáceos regados durante verano y otoño.

El procedimiento resulta sencillo desde un punto de vista metodológico. Además, las mejoras que se han introducido en los últimos años<sup>8</sup>, tanto en los sistemas de proceso digital de imagen y equipos informáticos, como en la disponibilidad de datos de imagen y cartografía de apoyo, ayudan considerablemente a simplificar este trabajo así como a conseguir unos resultados contrastados.

La elaboración del mapa de superficie regada se resume en la ejecución de una serie de tareas sucesivas:

- a) Cálculo de índices de vegetación para cada una de las fechas disponibles.
- b) Uso de los datos de distribución de cultivos regados tomados en campo y de composiciones en color, para la definición de valores umbrales en cada índice de vegetación, con objeto de segmentar la imagen en dos categorías: “*zonas de vegetación activa*” / “*otros usos del suelo*”.
- c) Unión de mapas de zonas de vegetación activa para cada fecha en un único mapa de “*vegetación activa*” durante el verano de 2009.
- d) Uso de datos geográficos auxiliares para separar por un lado, zonas agrícolas de zonas no agrícolas, y por otro, zonas con cultivos anuales de zonas con cultivos permanentes (leñosos). Obtención del mapa de herbáceos regados durante el verano y otoño de 2009.
- e) Uso de cartografía de delimitación de parcelas agrarias para la adecuación del mapa de superficie regada a una escala de trabajo de mayor detalle.

El primer paso ha consistido en el cálculo de índices de vegetación. Dado que la posterior elaboración del mapa de vegetación activa se trata de un proceso de tipo empírico, la elección del índice de vegetación a emplear no resulta un aspecto crítico. Se ha optado por el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), debido a su uso generalizado, su facilidad de cálculo y a la existencia de una mayor cantidad de estudios que lo relacionan con diferentes parámetros agronómicos que varían ante la presencia de riego. Este índice ha sido obtenido para cada una de las fechas de verano y otoño disponibles (ver Tabla 12).

---

<sup>8</sup> Durante el curso 2000-2001, realicé mi proyecto de fin de carrera sobre este tema, con el título “Uso de la teledetección para la determinación de superficies regadas en la Cuenca Alta del Guadiana”. En menos de diez años, el tiempo necesario para llevar a cabo un trabajo similar se ha reducido de forma notable, y los datos de apoyo disponibles permiten una mejora apreciable en la extracción de la información de interés.

A continuación, se ha procedido a la identificación de valores discriminantes de la vegetación activa. Este proceso se basa en la integración de un análisis visual sobre las composiciones en color infrarrojo, con un análisis cuantitativo de los valores del índice de vegetación, contando con el apoyo de datos tomados en campo.

Las composiciones en color se emplean para la determinación visual de las superficies regadas durante el verano. Con este objeto, se considera que las composiciones en color infrarrojo resultan las más adecuadas, permitiendo una mejor discriminación de la respuesta típica producida por los cultivos herbáceos regados. Las diferencias existentes entre las características de diferentes cultivos son más apreciables en estas composiciones que en color natural, que se consigue empleando únicamente las bandas correspondientes al espectro del visible (Figura 25).



Figura 25. Diferencias entre composiciones en color natural (izquierda) y en color infrarrojo (derecha).

A partir de la integración de los mapas de índice de vegetación, las imágenes en color infrarrojo y la cartografía de las parcelas de campo, se han medido los rangos de valores de NDVI típicos para cada cultivo y fecha. Las composiciones en color han servido para comprobar que los cultivos hayan alcanzado un estado de desarrollo suficiente como para poder ser discriminados espectralmente.

De esta forma, se han definido, para cada fecha, los valores mínimos del NDVI asociados a cultivos regados que se encuentren en una fase de desarrollo foliar cercana a su máximo.

Las relaciones existentes entre el NDVI y diferentes parámetros agronómicos son robustas (ver capítulo 2.2.2.1) y muestran la sensibilidad del índice ante la existencia de cubiertas vegetales densas, que presenten una absorción elevada de la luz útil para la fotosíntesis (propia de plantas en crecimiento) y que dispongan de dosis de agua suficientes para poder refrigerarse convenientemente mediante transpiración.

El análisis de los valores mínimos de NDVI en las parcelas regadas ha servido como base para generar mapas de distribución de las zonas vegetadas y potencialmente regadas. Cualquier píxel de la imagen que tenga un valor igual o superior al valor



discriminante definido (valor umbral) ha sido asignado a la categoría de “*vegetación activa*”. Los mapas para cada fecha, han sido integrados en un único mapa que recoge el total de la vegetación activa durante el verano y otoño de 2009.

Esta cartografía contiene, además de las superficies de herbáceos en regadío, otras zonas del territorio cubiertas de vegetación y que comparten las características empleadas para la discriminación de la posible existencia de riego. Estas otras zonas se componen de diversos tipos de vegetación natural (zonas forestales, áreas de bosque bajo y matorral denso, zonas húmedas o encharcadas...), y de cultivos leñosos (principalmente viñedo) con alta actividad y cubierta foliar.

Para la determinación de las superficies ocupadas por cultivos herbáceos en regadío dentro del mapa de superficies de vegetación activa, se ha optado por emplear datos geográficos auxiliares. Una posibilidad diferente habría sido la aplicación de procesos de segmentación de imagen para la elaboración de mapas temáticos de usos del suelo. Sin embargo, la disponibilidad de mapas de apoyo a una escala de trabajo de mayor detalle ha propiciado la selección del método expuesto.

En primer lugar, se ha utilizado el mapa de usos del suelo generado dentro del proyecto SIGPAC (Sistema de Información Geográfica para la Política Agraria Comunitaria) (ver apartado 3.4). Esta cartografía se elaboró para identificar la distribución de parcelas agrícolas con objeto de establecer una base gráfica que permita a los agricultores y ganaderos realizar las solicitudes de ayudas comunitarias ligadas a la superficie, por lo que a partir de su leyenda temática resulta posible discriminar entre zonas con potencial uso agrícola y zonas sin uso agrícola. Dentro de la primera categoría se han contemplado los usos del suelo etiquetados como huerta (HU), invernaderos y cultivos bajo plástico (IV), pastizal (PS) y tierra arable (TA), así como todos los asociados a la presencia de cultivos leñosos. Las zonas sin uso agrícola se corresponden con zonas urbanas, infraestructuras, improductivos y áreas con vegetación natural.

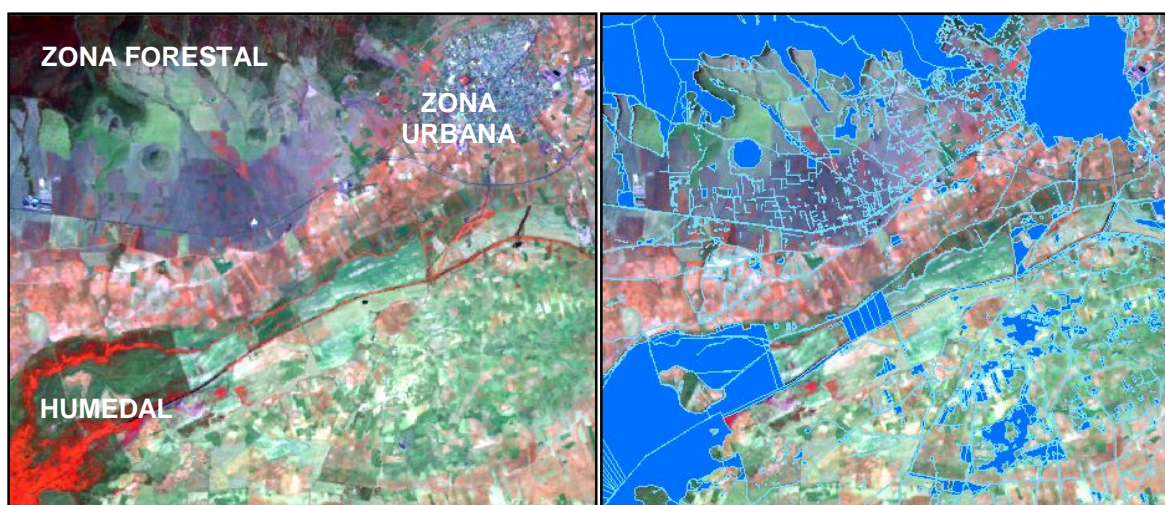


Figura 26. Máscara de zonas no agrícolas. En la figura de la izquierda se muestra una imagen en color infrarrojo de verano. En la derecha se superpone la máscara de zonas sin uso agrícola.

Dado que este mapa se elaboró entre los años 2002 y 2005, se ha realizado una actualización con el apoyo de una imagen en color generada a partir de la cobertura SPOT de máxima resolución (2,5 metros), obteniéndose la cartografía de zonas con/sin potencial uso agrícola. Este dato ha servido para realizar una primera segmentación del mapa de vegetación activa.

Como segunda fuente de datos auxiliares, se ha usado el mapa de viñedo y cultivos leñosos regados, actualizado al año 2009 (ver apartado 4.3.1). Gracias a este mapa, se pueden eliminar del mapa de superficies de vegetación activa, todas aquellas parcelas ocupadas por cultivos de porte leñoso, obteniéndose como resultado un mapa (en modo ráster) de la superficie de herbáceos regados.

Una potencial fuente de error es la presencia de cultivos asociados de viñedo y melón, que aunque no resulta frecuente, sí que ha sido observada en algunas explotaciones. Se ha decidido considerar este tipo de parcelas como cultivos herbáceos regados, ya que la mayor parte de su consumo se debe a las necesidades hídricas del melón, aprovechándose el viñedo de los residuales del riego. Se ha realizado una revisión de las parcelas de viñedo en las que se observan valores anormalmente altos de NDVI, identificándose en varias de ellas una evolución en su respuesta espectral propia de cultivos de melón.

En este punto del proceso, y como medida de control de calidad:

- i) Se ha comprobado que la totalidad de la muestra de cultivos recogida durante la campaña de campo de herbáceos regados se encontrase dentro del mapa de superficies regadas, con resultados satisfactorios.
- ii) Se ha controlado la presencia de zonas sin cultivar dentro del mapa de superficies regadas, habiendo sido necesario eliminar algunos bordes en las proximidades de zonas de vegetación natural. Estos errores se han originado por culpa de las diferencias de precisión gráfica entre los mapas extraídos de las imágenes Landsat (1:150.000) y el mapa SIGPAC (1:5.000).

El mapa ráster de superficies de herbáceos de verano mantiene la precisión heredada de la escala de trabajo de las imágenes Landsat y su unidad mínima de información se corresponde con su tamaño de píxel.

Como último paso del proceso, este mapa se ha transformado en una cartografía de las parcelas ocupadas por cultivos herbáceos regados durante el verano. Con este fin, se ha diseñado un proceso, de tipo semiautomático, para la adecuación entre el mapa de superficie regada y la capa de parcelas SIGPAC con uso agrícola potencial. El mapa de superficie regada se vectoriza, y posteriormente se cruza espacialmente con la cartografía de parcelas con objeto de cuantificar el porcentaje de cada parcela agrícola que resulta cubierto por superficie regada.



En función de este porcentaje (%SR), del tamaño de las parcelas agrícolas (SPA) y de la cantidad de superficie regada (SR), se ha diseñado un árbol de asignación, que ha servido para categorizar todas las parcelas del mapa de superficie agraria potencial en tres posibilidades: “*parcela totalmente regada*”, “*parcela sin riego*” y “*parcela parcialmente regada*”. Las reglas de configuración del árbol de asignación se han ajustado de forma empírica, bajo el criterio de maximizar la automatización del proceso sin introducir errores significativos, y se resumen de la siguiente forma:

- a) si  $\%SR \neq 0$  y  $\%SR \leq 15\%$ 
  - a.1) si  $SR < 1ha \Rightarrow$  parcela sin riego
  - a.2) si  $SR \geq 1ha \Rightarrow$  parcela parcialmente regada (revisar)
- b) si  $\%SR \geq 85\%$ 
  - b.1) si  $SPA \leq 5ha \Rightarrow$  parcela totalmente regada
  - b.1) si  $SPA > 5ha \Rightarrow$  parcela totalmente regada (revisar)
- c) si  $\%SR > 15\%$  y  $\%SR < 85\% \Rightarrow$  parcela parcialmente regada (revisar)

La primera regla, permite eliminar la mayor parte de los píxeles de borde que se han introducido en el mapa de superficie regada. En el caso de que la superficie regada represente un porcentaje reducido dentro de una parcela y de que no ocupe más de 1 ha, la parcela se excluye del mapa final. Si la superficie regada es igual o superior a la hectárea, se comprueba que exista al menor una superficie continua mayor que 0,5 hectáreas y se revisa de forma visual.

La segunda regla marca las condiciones para que cuando la superficie regada ocupa la práctica totalidad de una parcela, ésta se incluya totalmente en el mapa final. Las parcelas de mayor tamaño son revisadas a partir de las imágenes en color infrarrojo.

En los casos intermedios, se asume que la superficie regada dentro de la parcela es la unidad de cultivo, aunque se identifican estas parcelas para que también sean revisadas, con objeto de asegurar que sus límites sean definidos correctamente.

Durante esta revisión, se ha aprovechado para acometer otros objetivos, de forma que en un mismo proceso, se han:

- Ajustado los límites de las parcelas pendientes de revisión según el árbol de asignación.
- Identificado posibles parcelas en regadío que no se encontrasen contenidas en el mapa de superficie regada.
- Dividido las parcelas en unidades de cultivo, cuando en una misma parcela se observen cultivos diferentes plantados de forma contigua o un mismo cultivo con distinto calendario fenológico.

A partir de este último paso, se identifican las unidades de cultivo: definidas como las zonas cubiertas por un mismo cultivo y con un desarrollo agronómico común. En relación a este punto, se planteó la posibilidad de automatizar el proceso, para lo que se ensayó un método basado en el cálculo de variables texturales de segundo orden (ver apartado 2.2.2.1) sobre el NDVI de cada parcela regada o parcialmente regada. Esta aproximación muestra un potencial aceptable, pero ha sido desechada debido a la importante diferencia de escala de trabajo existente entre las imágenes y la cartografía de parcelas.

El resultado obtenido al cartografiar las unidades de cultivo resulta más ajustado al realizarse con el apoyo de la cartografía de parcelas y de otras imágenes de mayor resolución. La ausencia de automatización motiva que este proceso resulte más lento y laborioso, (y menos sofisticado desde el punto de vista de la investigación), pero teniendo en cuenta el componente operativo del trabajo y la importancia de obtener datos lo más precisos posibles (y por tanto, lo más cercanos a la realidad), se ha optado por una revisión global basada en el análisis visual.

En la Figura 27, se recoge un ejemplo del mapa de unidades de cultivo de herbáceos de verano, resultado de esta fase del trabajo. Se emplean como referencia dos tipos de imágenes, con escalas de trabajo de 1:150.000 (Landsat), y 1:2.500 (ortofotografía en color natural): la superposición de la cartografía de unidades de cultivo sobre la imagen Landsat del verano de 2009 (30 metros de resolución) ilustra la identificación de la información temática de distribución de cultivos herbáceos regados, mientras que la superposición sobre la ortofotografía de 2006 (0,5 metros de resolución) muestra la calidad métrica del mapa obtenido. La integración de los mapas de superficie regada obtenidos a partir del proceso digital de imágenes y la cartografía de Catastro, ha permitido la obtención de un mapa de detalle de las unidades de cultivo de herbáceos durante el verano y otoño.

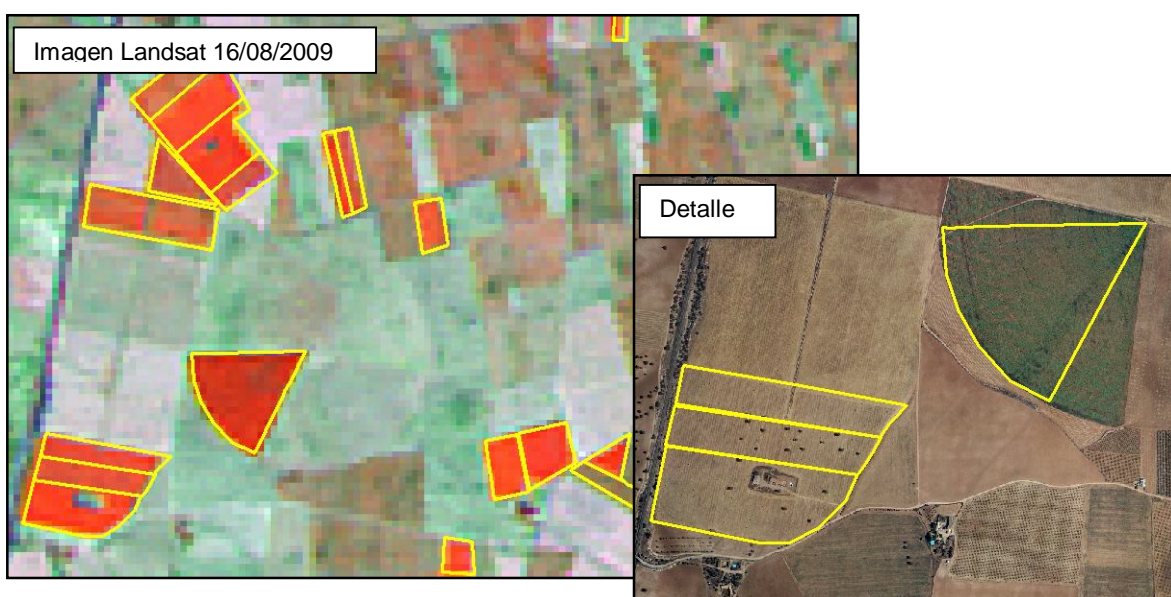


Figura 27. Ejemplo de visualización del mapa de superficie de herbáceos regados durante el verano.

#### 4.1.3. Mapa de cultivos herbáceos regados durante el verano y otoño de 2009

El conocimiento de la distribución de superficie regada resulta ya de por sí, un dato de indudable valor, si bien desde el enfoque de la gestión hídrica no aporta información directa acerca del consumo derivado de las extracciones para riego.

Para ello, resulta necesario profundizar en la identificación del tipo de cultivo en regadío existente dentro de cada una de las unidades agronómicas. El valor añadido que aporta este dato radica en la posibilidad de aplicar dotaciones anuales por hectárea para cada tipo de cultivo, que pueden obtenerse de diferentes fuentes. De esta forma, la delimitación de los cultivos regados permite la estimación del consumo asociado a las extracciones de aguas subterráneas para el cultivo de herbáceos de alta dotación.

La obtención de mapas de cultivos a partir de imágenes de satélite es una aproximación extendida, fundamentalmente basada en procesos de clasificación multiespectral (ver apartado 2.2.2.1). Las metodologías de clasificación descritas en otros estudios que abordan un objetivo similar resultan variadas, y obtienen, por regla general, resultados satisfactorios, caracterizados por una identificación fiable de los diferentes cultivos.

A pesar de la aceptación de esta metodología general, no existe un consenso acerca de la idoneidad de un tipo de clasificador sobre los demás al efecto de identificar cultivos. En el presente trabajo de investigación, la singularidad de la aproximación no se centra en el tipo de algoritmo empleado en la clasificación, sino que incide sobre otros dos aspectos diferentes:

- las posibilidades de mejora en la identificación de cultivos que ofrecen procesos de apoyo basados en la *fotointerpretación asistida* y
- un enfoque basado en la toma de decisiones de asignación por unidad de cultivo frente a la aproximación más convencional basada en la clasificación a nivel de píxel.

La metodología propuesta integra la clasificación multiespectral supervisada de una serie temporal de imágenes de satélite, con procesos de fotointerpretación basados en la búsqueda de elementos distintivos de algunos tipos de cultivos. La optimización en el uso de las diferentes técnicas de clasificación se articula a través de un árbol jerárquico de decisión. Además, la metodología seguida se aplica sobre unidades agrícolas previamente definidas.

El desarrollo de la metodología seguida se lleva a cabo en tres fases sucesivas:

- i) Diseño y ejecución de los procesos de fotointerpretación asistida
- ii) Proceso de clasificación multiespectral supervisada
- iii) Asignación de prioridades mediante un árbol jerárquico de decisión

#### 4.1.3.1. Fotointerpretación asistida

La base de esta aproximación ha sido inspirada por las observaciones realizadas durante las campañas de campo y en la fase de análisis visual. Para determinados cultivos, se aprecian fases concretas de su ciclo fenológico que se trasladan a respuestas espectrales características. Estas respuestas derivan, bien del marco de siembra y del fenotipo del cultivo, bien de la realización de determinadas prácticas agronómicas. Muchas de estas situaciones no son observables directamente a nivel de píxel y resultan difíciles de parametrizar a nivel de unidad de cultivo. Sin embargo, un intérprete entrenado puede identificar con fiabilidad la presencia de determinados cultivos analizando una serie temporal de composiciones en color que recojan su evolución a lo largo de la campaña de riego, en base a elementos que resultan propios.

El empleo de técnicas de fotointerpretación presenta inconvenientes que comprenden la posibilidad de diferencias de criterio entre distintas personas, el tiempo y esfuerzo asociado, la necesidad de contar con intérpretes con suficiente conocimiento y experiencia para procesar todos los datos necesarios, o la incapacidad para analizar correctamente todos los casos que se presentan. No obstante, resulta una aproximación que debe ser tomada en cuenta, al posibilitar la identificación de algunos cultivos, en casos determinados, con una fiabilidad casi total (Ozdogan *et al*, 2010).

La identificación mediante procesos automáticos de las características que permiten la discriminación de algunos cultivos no resulta sencilla debido a la amplitud de opciones que sería necesario considerar. Sin embargo, es más factible localizar parcelas que sean candidatas claras para ser asignadas a un determinado tipo de cultivo. Teniendo este hecho en cuenta, se plantea una metodología de trabajo, que se ha denominado “*fotointerpretación asistida*”.

Esta aproximación limita el proceso de fotointerpretación a un conjunto de parcelas, donde a priori, la posibilidad de encontrar el cultivo de referencia sea elevada. Se comienza por determinar espectralmente los tipos de respuestas que, en fechas concretas, o por cambios entre diferentes fechas, sean útiles para identificar los cultivos. A partir de esta información, se definen unas condiciones de contorno para delimitar conjuntos de parcelas donde los cultivos tienen un comportamiento espectral similar a las respuestas tipo; identificándose parcelas potencialmente ocupadas por los cultivos de interés. De esta forma, se reduce considerablemente el número de parcelas a analizar y se consigue una mayor automatización en la identificación de cultivos.

La fotointerpretación asistida se ha diseñado y llevado a cabo para un total de 5 tipos diferentes de cultivos: *alfalfa*, *cebolla*, *melón* o *sandía*, *patata* y *pimiento* o *tomate*. Los criterios de identificación empleados coinciden con los expuestos en el apartado 4.1.1.

En el caso de la alfalfa, el proceso consiste en el seguimiento de los valores medios de NDVI en cada parcela regada, que han sido calculados para el conjunto de fechas

disponibles. Las parcelas de alfalfa presentan respuesta en las imágenes de primavera y verano, y al mismo tiempo, muestran variaciones bruscas en su comportamiento espectral asociadas a los ciclos de siega y rebrote típicos de este tipo de cultivos.

Así, los criterios empleados para la identificación de cultivos de alfalfa son la existencia de valores elevados en primavera y al menos alguna de las fechas de verano, y además, la presencia de cambios rápidos en el índice provocados por las variaciones en la densidad de la cubierta vegetal.

El carácter singular del cultivo de la alfalfa en relación a los restantes herbáceos regados durante el verano facilita su detección. La práctica totalidad de las parcelas identificadas de forma automática han sido corroboradas en el análisis visual de imágenes.

En los casos del melón o sandía y pimiento o tomate, se ha localizado la respuesta producida por la presencia de los plásticos durante las fases de nascencia y crecimiento de los cultivos. Durante las observaciones en campo se ha constatado que el melón y la sandía se cultivan bajo plástico blanco, mientras que para las cucurbitáceas se utiliza un tipo de plástico diferente, de color negro. La cubierta de plástico se reduce a los surcos en los que se ha realizado la siembra, por lo que en los píxeles de imagen se recoge la reflectancia proveniente tanto del plástico como de la fracción de suelo desnudo que queda a la vista. Esta situación, dificulta la discriminación de este tipo de ocupación, que en caso de una cubierta completa del terreno sería reconocible con mayor claridad.

En el caso del melón y la sandía, la respuesta de los plásticos puede apreciarse durante un periodo amplio de tiempo, si bien sufre cambios dependiendo del color del suelo y del grado de desarrollo de las plantas. El plástico produce un brillo elevado en las bandas del visible, y especialmente, en la región del azul. Dentro de las composiciones en color posibles, se ha elegido la elaborada con las bandas azul y del infrarrojo medio para la identificación de la presencia de plásticos, que adoptan tonos rosáceos en esta imagen.

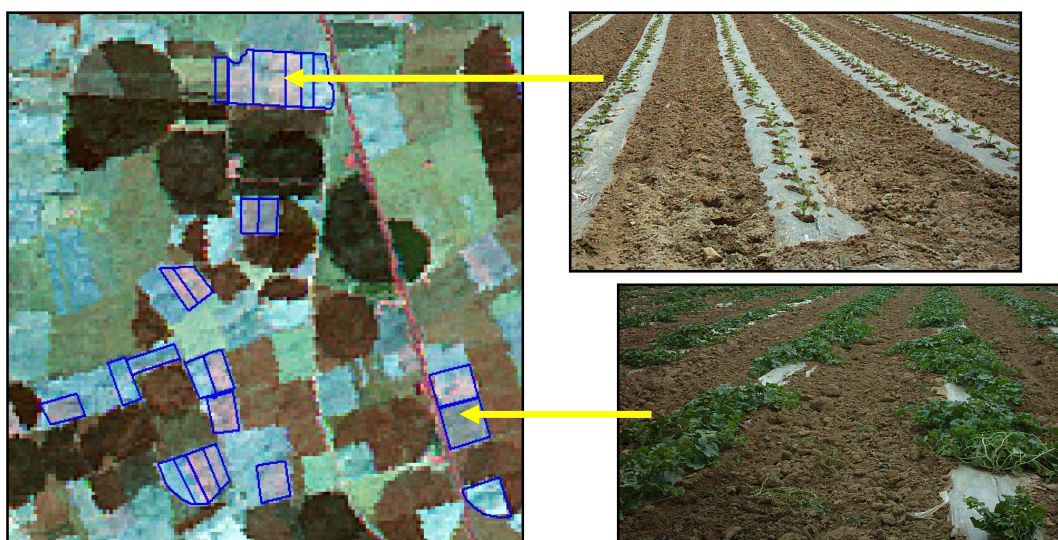


Figura 28. Discriminación visual de plásticos en cultivos de melón.



En el caso del plástico negro, la respuesta es diferente, debido a su color oscuro y mayor opacidad, observándose principalmente durante el mes de mayo y principios de junio. La banda que presenta una mayor cantidad de información para su discriminación frente a otros cultivos es la del infrarrojo cercano, donde el plástico negro absorbe la radiación incidente con mayor intensidad que las zonas vegetadas y suelos desnudos. En este caso, la composición en color seleccionada para la discriminación del pimiento o tomate ha sido la de color infrarrojo (bandas infrarroja próxima, infrarroja media y roja).

Para la localización de los cultivos bajo plástico se han elaborado mapas que delimitan parcelas con posibilidad de haber estado cubiertas por plástico en algún momento de su ciclo. El proceso ha sido diseñado para que resulte similar a una clasificación supervisada por mínima distancia, utilizando como dato de partida, las bandas de las composiciones en color infrarrojo citadas para cada cultivo.

Para ello, se definen varias muestras representativas de las respuestas de cultivos bajo plástico en cada fecha; y para cada muestra, se calculan los valores medios y desviación estándar en cada banda. El siguiente paso consiste en calcular, para cada píxel del mapa de superficie regada, la distancia a cada uno de los grupos muestrales, seleccionando el valor mínimo como definitivo, de acuerdo a la ecuación 3. Los datos de varianza se utilizan para normalizar el peso otorgado a cada banda dentro del cálculo de la distancia espectral desde cada píxel a cada grupo muestral.

$$D_{\text{pix}} = \text{MIN}_{j=1}^n \left\{ \sum_{i=1}^3 (\text{ABS}(a_{ij} (\overline{\text{ref}}_{ij} - \text{ref}_i))) \right\} \quad [\text{Ecuación 3}]$$

donde  $D_{\text{pix}}$  es el valor de distancia calculado para cada píxel

las variables  $i$  y  $j$  representan respectivamente el número de banda y el grupo muestral,

la función  $\text{MIN} \{ \}$ , calcula el mínimo de un conjunto de  $n$  valores que coinciden con el número total de grupos muestrales, y la función  $\text{ABS}$  devuelve el valor absoluto,

$a_{ij}$  representa el coeficiente de ponderación asociado a cada banda y grupo muestral, definido como el cociente entre el mínimo común múltiplo de las desviaciones estándar medias para todas las muestras y bandas y la desviación estándar media de cada pareja de banda/grupo muestral,

$\overline{\text{ref}}_{ij}$  es el valor medio de reflectancia (cuantificada en una escala entre 0 y 100) para una muestra en una banda determinada y

$\text{ref}_i$  es el valor de reflectancia en un píxel concreto en la banda  $i$

Este proceso se ha realizado sobre imágenes Landsat, aplicándose para las fechas de mayo y junio en el caso de la detección de plásticos blancos y en la imagen de final de mayo para el plástico negro. Para cada fecha se ha elegido un valor umbral que permite separar del conjunto de parcelas regadas aquellas que serán fotointerpretadas.

Por último, la localización de los cultivos de cebolla y patata se ha basado en la respuesta de la vegetación.

En el caso de la cebolla, los criterios que permiten su identificación se sustentan en la menor fracción de cubierta vegetal sobre el suelo en relación a otros cultivos, así como la mayor humedad del terreno y su alternancia dentro de la parcela de acuerdo a los desplazamientos realizados en los sistemas de riego móvil.

El proceso seguido para la determinación de las parcelas potenciales es análogo al descrito para los plásticos, seleccionando muestras según los colores de las parcelas cultivadas de cebolla en las imágenes de julio, que resultan característicos de este cultivo.

En el caso de la patata, su rasgo de identificación se basa en los cambios bruscos que sufre el cultivo. Se han observado dos comportamientos fenológicos típicos en este cultivo, según su máximo desarrollo y su recogida se produzcan en los meses de julio o agosto. En ambos casos, se aprecia un rápido crecimiento del cultivo junto a una fase corta de máxima respuesta que no se prolonga más allá de mes y medio. Tras la cosecha de los tubérculos, en las imágenes se observa, bien una respuesta de baja intensidad producida por la presencia de la vegetación arrancada, bien una respuesta propia de suelo desnudo si el terreno ha sido arado y aplanado. A partir de un proceso similar al definido para la alfalfa, se localizan parcelas que presentan un comportamiento cercano al observado para los cultivos de patata.

Tras la identificación de las parcelas candidatas para cada uno de los cultivos, se ha procedido a su observación sobre series temporales que contienen las imágenes en color infrarrojo de interés para cada caso. Cuando con la información disponible, se han observado características propias de cada cultivo, se han marcado las parcelas para su inclusión en el mapa final de cultivos regados según fotointerpretación. En caso contrario, las parcelas no han sido asignadas a ninguna categoría.

La interpretación visual, basada en la capacidad del cerebro humano y en la experiencia sobre el terreno, es un método que requiere un gran esfuerzo, pero resulta muy preciso para la identificación de usos del suelo, incluyendo el regadío (Ozdogan *et al*, 2010).

#### *4.1.3.2. Clasificación multiespectral*

El proceso de clasificación multiespectral se ha basado en la extracción de información temática a partir de las imágenes de satélite con objeto de asignar las parcelas regadas a un tipo de cultivo concreto. Este procedimiento se sustenta en la integración de los datos multiespectrales y multitemporales proporcionados por las imágenes con la verdad terreno obtenida en las campañas de campo. El proceso de clasificación consta de una fase de diseño, donde se especifica la leyenda, el conjunto de datos a clasificar, y los datos multiespectrales que servirán para llevar a cabo el proceso; de una fase de

entrenamiento, en la que se establecen las relaciones espaciales entre la muestra de campo y los datos multiespectrales; y de una fase de asignación, en la que todos los elementos considerados en el proceso son incluidos en una categoría temática mediante el uso de un algoritmo o clasificador (ver apartado 2.2.2.1).

En el caso de las clasificaciones relacionadas con la identificación de cultivos, el proceso implica el uso de una serie de *datos multiespectrales* adquiridos en varios momentos de su ciclo de crecimiento, aportando un enfoque de carácter *multitemporal*.

Para cada tipo de cultivo que se considere en la clasificación deben establecerse las fechas óptimas para su discriminación, teniendo en cuenta la duración y fases de su desarrollo fenológico, las épocas en que se encuentra en su estado vegetativo más vigoroso, la existencia de cambios bruscos en la respuesta del cultivo entre dos fechas determinadas y la presencia de características propias relacionadas con las prácticas agrícolas.

El primer paso del proceso de clasificación consiste en la definición de la población que va a ser clasificada, así como de la información concreta que va a usarse en el proceso. En este caso, la clasificación se limita al mapa de superficie de herbáceos regados en verano de 2009. Una de las singularidades de la metodología radica en que el proceso de clasificación se realiza empleando la “*unidad de cultivo*” como base para la decisión de asignación. Los procesos de clasificación se efectúan habitualmente empleando la unidad de división de imagen, por lo que se produce una asignación para cada píxel. Sin embargo, teniendo en cuenta que los cultivos presentan una continuidad espacial sobre el terreno que sobrepasa el ámbito de píxel, resulta más adecuado tomar decisiones de asignación únicas para cada unidad de cultivo.

La aproximación a nivel de cultivo resulta la de mayor lógica interna y, aunque requiere de un trabajo previo importante, debería producir una mejora en la calidad del mapa de cultivos regados en forma de una mayor fiabilidad, precisión y detalle.

La identificación a nivel de píxel incorpora problemas difíciles de controlar. El desajuste geométrico entre las imágenes supone que los píxeles de diferentes fechas no representen exactamente la misma fracción del territorio. Esta situación se agrava en los límites de las parcelas, donde se produce el llamado “efecto borde”, cuando se mide una mezcla entre la respuesta del cultivo y la de otro cultivo o uso del suelo diferente. La clasificación por unidad de cultivo introduce mayor coherencia en el proceso al limitar la heterogeneidad interna y de borde propia de los cultivos, al mismo tiempo que asegura una representación más precisa de su distribución. Además, se maneja la hipótesis de que al considerar de forma conjunta una mayor cantidad de datos que hacen referencia al comportamiento medio de una misma unidad de superficie, el proceso de toma de decisión debería ser más robusto.



En esta investigación, se han ensayado diferentes procesos de clasificación, partiendo de varias combinaciones de datos; utilizándose el conjunto de todas las fechas adquiridas, grupos de fechas e, incluso, solamente fechas concretas. En todos los casos, se han usado valores medios de los diferentes datos de entrada, calculados para cada una de las unidades de cultivo. La leyenda temática utilizada para la asignación de cultivos ha variado dependiendo de la cantidad de imágenes empleadas.

Cuando se ha trabajado con una o dos fechas, se ha seguido un procedimiento común en la bibliografía, basado en la selección de las bandas que muestren mayores diferencias entre sí, según la matriz de varianza-covarianza. En la clasificación de fechas aisladas y de pares de fechas no se ha abarcado el conjunto de la leyenda temática, sino que se ha optado por la discriminación de varios cultivos de interés en cada caso, de acuerdo a su representatividad y fase de desarrollo fenológico.

Se han realizado clasificaciones multiespectrales a partir de las imágenes de 31 de julio (cebolla, maíz melón/sandía y pimiento/tomate) y 1 de septiembre (maíz melón/sandía y pimiento/tomate), y para los pares de fechas de 28 de mayo y 29 de junio (cebolla, maíz, melón/sandía, patata y pimiento/tomate); 28 de mayo y 16 de agosto (alfalfa, melón/sandía y pimiento/tomate) 13 de junio y 29 de junio (cebolla, maíz, melón/sandía y pimiento/tomate) y, 15 de julio y 16 de agosto (alfalfa, melón/sandía, patata y pimiento/tomate).

Además, se han realizado clasificaciones en las que han intervenido series más extensas de fechas, empleándose métodos para la reducción del conjunto de datos a tratar. Por un lado, se han llevado a cabo dos clasificaciones a partir del conjunto de fechas disponibles durante el verano (entre finales de junio y principio de septiembre) y por otro, se ha diseñado otro proceso, basado a su vez en un enfoque multitemporal, en el que se han usado criterios de interés derivados a partir de imágenes puntuales de la serie.

En la primera de las clasificaciones sobre la serie completa, las imágenes han sido sometidas a un *Análisis de Componentes Principales* con objeto de realzar la información contenida, segregar ruido y reducir el tamaño de los datos de partida. Este análisis permite transformar, un número  $n$  de bandas, mediante la aplicación del ortovector correspondiente, en un conjunto más reducido que contiene la mayor parte de la información existente en las bandas originales. Se han escogido las primeras componentes principales de cada banda para el conjunto de fechas, al ser capaces de explicar la práctica totalidad de la variabilidad de los datos originales.

Además, se ha realizado otra clasificación empleando todas las bandas disponibles en los rangos del rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio de onda corta, que representan las bandas con menor correlación entre sí y recogen la mayor parte de la variación existente en los datos disponibles.

En la tercera de las aproximaciones multitemporales, se han seleccionado varios mapas calculados a partir de parámetros de interés para la identificación de los cultivos mayoritarios en la zona de trabajo. En concreto, los datos empleados han sido los índices de vegetación (NDVI) de las imágenes de 29 de junio, 15 de julio y 16 de agosto, junto con los mapas derivados de los procesos de fotointerpretación asistida diseñados para los cultivos de cebolla, melón/sandía y pimiento/tomate, que miden la mínima distancia espectral que se observa en alguna imagen en relación al comportamiento típico de estas cubiertas en fechas concretas. Todos estos mapas han sido normalizados a un mismo conjunto de valores para que las potenciales diferencias de escala no afecten al funcionamiento del clasificador. En el caso de los mapas de distancias, se han utilizado los valores umbrales elegidos para la identificación de parcelas candidatas con objeto de estandarizar la comparación de los datos.

Todos los procesos de clasificación se han llevado a cabo por separado para cinco áreas diferentes que abarcan la totalidad de los acuíferos objeto de estudio (Figura 29). Esta segmentación territorial se ha basado en la distribución espacial de los cultivos herbáceos regados durante el verano y de la superficie territorial ocupada por las escenas Landsat (ver Figura 11). Así, para cada una de las zonas, en el proceso de clasificación se han empleado imágenes adquiridas en las mismas fechas que cubren la totalidad de cada área de trabajo, así como muestras de campo representativas de los cultivos en regadío presentes.

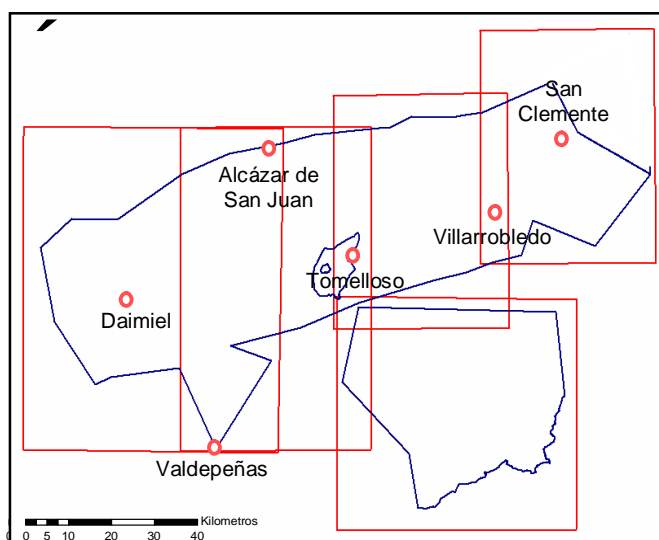


Figura 29. Zonificación para la clasificación de cultivos herbáceos en regadío en el verano de 2009.

El proceso seguido para la fase de entrenamiento de todas las clasificaciones parciales se ha basado en la integración de las muestras de campo con la información contenida en las bandas o mapas seleccionados en cada caso, trabajando únicamente sobre la parte del territorio contenida en el mapa de superficies de cultivos herbáceos regados.

El proceso de clasificación ha sido de tipo *supervisado*, empleando la información recogida durante las campañas de campo para crear *regiones de entrenamiento* que incluyen muestras de parcelas de distintos tipos de cultivo. Se han definido varias regiones de entrenamiento por cultivo, para abarcar un mayor número de estados fenológicos y vegetativos. De esta forma, para cada cultivo se consideran varios grupos muestrales que recogen diferentes ciclos de desarrollo. El número de grupos muestrales se ha ajustado a la abundancia relativa de cada cultivo según los datos recogidos en campo, evitando así la sobreponderación de cultivos con mayor variabilidad.

En todos los procesos de clasificación se ha utilizado el algoritmo de *máxima verosimilitud* (*Maximum Likelihood Classifier Method*), asociándole un umbral de clasificación obtenido empíricamente para cada caso.

Este clasificador utiliza como datos de entrada un conjunto de muestras definidas por un vector media  $n$ -dimensional (siendo  $n$  el número de bandas empleadas para la clasificación) y por una medida de la varianza asociada a cada grupo muestral. El clasificador de máxima verosimilitud calcula, para cada unidad de cultivo incluida en la población a clasificar, su posición relativa a los grupos muestrales dentro del espacio formado por las bandas de entrada. Posteriormente, si la distancia (en términos probabilísticos) de una unidad de cultivo a la posición fijada para alguno de los grupos muestrales es menor que un valor umbral, ésta queda asignada al tipo de cultivo que define esa región de entrenamiento. Si esto no sucede, el píxel queda sin clasificar (Figura 30).

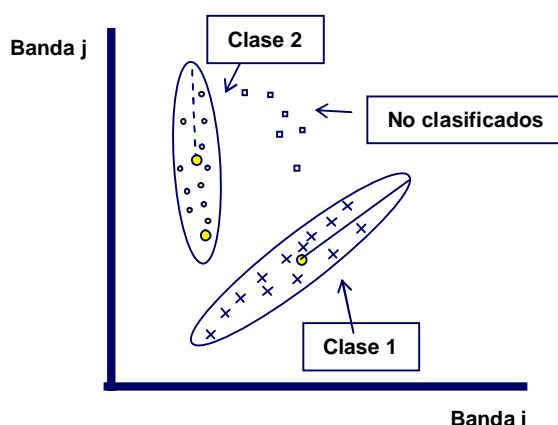


Figura 30. Funcionamiento del clasificador de máxima probabilidad

Los valores umbrales utilizados para incluir una parcela en una clase temática se han definido según un criterio restrictivo. Así, el algoritmo únicamente resuelve la clasificación si los valores observados en una parcela resultan muy cercanos a los que definen alguna de las regiones de entrenamiento.

El resultado global del proceso de clasificación consiste en un conjunto de 9 clasificaciones parciales (correspondientes a los enfoques sobre una, dos o series más amplias de fechas) para cada una de las cinco zonas definidas.

#### *4.1.3.3. Integración de resultados mediante un árbol jerárquico de decisión*

La aplicación de diferentes aproximaciones metodológicas (fotointerpretación asistida y clasificación multiespectral) puede ocasionar asignaciones de cultivo dispares para una misma parcela. Para resolver estas posibles incoherencias resulta necesario establecer una escala de prioridades que permita la integración de los diferentes mapas parciales de cultivos regados.

Con este objeto, se ha elaborado un árbol jerárquico para la integración de resultados, cuyo diseño se basa en el grado de fiabilidad observado durante una primera validación de los resultados obtenidos en los procesos de discriminación de cultivos. Este árbol define un orden de prioridad para la combinación, en un único mapa de cultivos regados, de los diferentes mapas generados en los procesos de fotointerpretación / clasificación.

Así, el mapa de cultivos en regadío se genera mediante operaciones secuenciales de unión espacial, de forma que se van incluyendo parcelas de acuerdo a una prioridad establecida según la fiabilidad asociada a cada proceso de discriminación y cada cultivo.

Para la determinación de la precisión de identificación para cada cultivo así como de la fiabilidad asociada, se ha reservado en torno al 25% del total de muestra recogida durante la campaña de verano y se ha efectuado un proceso de validación basado en la elaboración de matrices de confusión. Así, para cada proceso de discriminación (tanto para el proceso de fotointerpretación asistida como para los distintos procesos multitemporales de clasificación multiespectral), y distinguiendo según los cultivos definidos en la leyenda temática, se ha identificado la cantidad de superficie correctamente clasificada, así como la correspondiente a fallos en el proceso de asignación.

El resultado se recoge en forma de tablas en las que se estima el grado de acierto en la identificación de cada cultivo (caracterizado como el porcentaje de la muestra de campo correctamente clasificada), y se localizan los errores producidos.

En el caso de la fotointerpretación, los resultados son muy fiables (ver Tabla 17), si bien resultan incompletos al no abarcar todos los cultivos de interés. Con carácter general, la precisión de identificación, así como la fiabilidad en la detección de los cultivos son muy elevadas, limitándose los errores cometidos a casos concretos que se alejan de la norma habitual, y a cultivos con una distribución reducida.

Para los mapas obtenidos a partir de los diferentes procesos de clasificación multiespectral se han realizado análisis de validación similares. Los resultados se recogen en la Tabla 18, donde se resumen los datos de las nueve matrices de confusión elaboradas, en forma de datos de error de omisión y comisión para cada cultivo. Estos errores se definen como los valores complementarios de la fiabilidad y precisión, respectivamente.

Los cultivos de alfalfa no han sido incluidos en esta aproximación debido a que su elevada variabilidad por causa de la gestión de siegas desaconseja la metodología de clasificación para su identificación.

Tabla 17. Matriz de confusión para la clasificación mediante fotointerpretación asistida (en hectáreas)

		CAMPO						PRECISIÓN
		Alfalfa	Cebolla	Melón / Sandía	Patata	Pimiento/ Tomate	Otros cultivos	
CLASIFICACIÓN	Alfalfa	133,3						100,00%
	Cebolla		304,7				12,7	98,9%
	Melón/Sandía		10,8	1.025,0		10,9		97,9%
	Patata				73,5		7,0	91,3%
	Pimiento/Tomate			10,7		262,4	1,1	95,7%
	Otros cultivos	2,6	14,7	8,4	9,0	19,1	247,7	84,1%
FIABILIDAD		98,1%	92,3%	97,7%	89,1%	89,8%	94,2%	
Fiabilidad global		94,9%	( % de aciertos en relación a la superficie total)					
Fiabilidad media		93,4%	(Media de las fiabilidades asociadas a cada cultivo)					
Precisión media		94,6%	(Media de las precisiones asociadas a cada cultivo)					

Tabla 18. Errores de comisión y omisión por cultivo para cada una de las clasificaciones parciales propuestas

TIPO DE CLASIFICACIÓN	Error de Comisión / Error de Omisión (%)					
	CULTIVO					
	Cebolla	Maíz	Melón / Sandía	Patata	Pimiento / Tomate	Otros cultivos
<b>1 fecha</b>						
Julio	16,3/22,0	10,9/15,2	7,4/21,9	-	42,7/23,5	91,5/70,8
Agosto	62,7/54,4	49,8/27,3	24,3/49,2	-	56,2/55,3	88,7/48,2
<b>2 fechas</b>						
Mayo/Junio	12,6/48,7	12,9/17,4	3,1/12,3	36,2/52,6	8,3/19,2	89,3/15,6
Mayo/Agosto	14,4/49,2	31,4/18,0	12,9/20,4	-	13,0/19,1	89,3/36,1
Junio/Junio	22,6/61,4	3,0/22,5	8,6/26,1	-	33,9/21,8	95,0/57,9
Julio/Agosto	2,4/34,0	15,8/16,4	7,3/44,2	28,5/44,6	48,7/18,6	94,3/52,2
<b>Serie completa</b>						
Componentes Principales	13,2/15,4	17,1/30,7	17,6/16,7	48,2/59,1	45,8/45,3	84,7/62,8
Banda visible / Banda IR cercano / Banda IR medio	0/47,5	7,2/4,6	7,8/25,0	18,9/28,5	6,4/15,6	92,3/30,4
NDVI / Parámetros fotointerpretación	0/49,0	20,4/48,6	9,2/27,0	26,3/39,7	8,4/21,6	93,9/15,9

En la Tabla 18, llama la atención el error asociado a la categoría de “otros cultivos”. Este hecho deriva de que el criterio elegido para la elección de umbrales haya sido de tipo restrictivo, primando la precisión de identificación sobre el concepto de fiabilidad. Esto implica que se han definido grupos de clasificación estrictos, identificándose una parcela como perteneciente a un grupo solamente cuando su semejanza espectral es elevada. Este enfoque induce a que el número de parcelas que quedan sin clasificar resulte considerable, lo que redundará en que la precisión en la identificación de la categoría de “*otros cultivos*” sea reducida. La poca representatividad de otros cultivos fuera de los considerados en la clasificación potencia esta situación.

A partir de los resultados de validación sobre los mapas parciales obtenidos a partir de los diferentes procesos de clasificación, se ha aplicado una primera fase del árbol de decisión, para su integración en un único mapa. Las parcelas han sido incluidas secuencialmente en el mapa final, comenzando por aquellas ocupadas por cultivos que arrojen una mayor probabilidad de una asignación correcta en las diversas clasificaciones parciales.

Esta aproximación se realiza de forma secuencial, definiéndose cada paso del proceso a partir de un criterio diferente de asignación. Como consecuencia, después de la aplicación de cada criterio, las parcelas van quedando asignadas a una categoría del mapa final. El orden de aplicación de los criterios deriva de los procesos de validación, y se basa en la fiabilidad de las clasificaciones realizadas. Así, cada criterio permite la inclusión en el mapa final de los cultivos identificados con mayor fiabilidad de entre los que ocupan parcelas aún no asignadas.

El dato que se considera de mayor interés es el error por comisión, que nos indica el grado de acierto en la identificación de cada cultivo dentro de cada proceso parcial de clasificación. Los distintos procesos de clasificación han sido ordenados de menor a mayor error de comisión para cada cultivo, considerándose este dato como la base para la definición del árbol de asignación. El error por omisión es tenido en cuenta como dato de apoyo para la estimación de la capacidad de identificación que muestra cada proceso parcial sobre cada uno de los cultivos.

El proceso de determinación de la jerarquía para cada uno de los criterios del árbol de asignación ha sido de tipo dinámico, recalculándose las precisiones de identificación después de cada fase. La secuencia seguida para la elaboración del mapa final resultado de la clasificación multiespectral de cultivos herbáceos regados en verano sigue el orden descrito en la Tabla 19.

Desde el momento de su asignación al mapa de cultivos, las parcelas dejan de ser tenidas en cuenta para la cuantificación de los errores de omisión y comisión, que van siendo modificados después de cada fase de aplicación del árbol de decisión. Por este motivo, el orden de aplicación de los criterios no se corresponde exactamente con el que

podría preverse mediante la observación de la Tabla 18, que en este caso solo recoge la situación inicial del proceso.

Tabla 19. Criterios para la definición del árbol jerárquico de decisión

ORDEN DE ASIGNACIÓN	CRITERIO UTILIZADO
1.- CEBOLLA	Clasificado como cebolla en serie completa de bandas o serie completa de NDVI – fotointerpretación
2.- CEBOLLA	Clasificado como cebolla en 2 fechas: julio – agosto
3.- PIMIENTO/TOMATE	Clasificado como pimiento/tomate en serie completa de bandas
4.- MAÍZ	Clasificado como maíz en serie completa de bandas
5.- MAÍZ	Clasificado como cebolla en 2 fechas: junio – junio
6.- PIMIENTO/TOMATE	Clasificado como pimiento/tomate en serie completa de NDVI – fotointerpretación
7.- MELÓN/SANDÍA	Clasificado como melón/sandía en serie completa de NDVI – fotointerpretación
8.- MELÓN/SANDÍA	Clasificado como cebolla en 2 fechas: mayo – junio
9.- CEBOLLA	Clasificado como cebolla en 2 fechas: mayo – junio
10.- MELÓN/SANDÍA	Clasificado como cebolla en 2 fechas: mayo – agosto
11.- CEBOLLA	Clasificado como cebolla en serie completa de componentes principales
12.- MELÓN/SANDÍA	Clasificado como melón/sandía en serie completa de componentes principales
13.- PATATA	Clasificado como patata en serie completa de bandas

Como resultado de la aplicación del árbol jerárquico de decisión se obtiene el mapa final resultado del proceso global de clasificación, cuya precisión y fiabilidad se recoge en la Tabla 20.

Este mapa es el resultado de la integración de los diferentes procesos de clasificación multiespectral, habiéndose empleado todas las clasificaciones con excepción de las referidas a una única fecha. Este hecho refuerza la necesidad de realizar aproximaciones de tipo multitemporal para abordar clasificaciones de cultivos.

Finalmente, se ha procedido a unir los dos mapas de cultivos disponibles, correspondientes a los resultados finales de los procesos de fotointerpretación asistida y clasificación multiespectral.

Tabla 20. Matriz de confusión para la unión de clasificaciones multiespectrales

		CAMPO						PRECISIÓN
		Cebolla	Maíz	Melón/ Sandía	Patata	Pimiento/ Tomate	Otros Cultivos	
CLASIFICACIÓN	Cebolla	<b>280,4</b>		9,7				96,7%
	Maíz		<b>205,4</b>	5,2				97,5%
	Melón/Sandía	31,3	1,8	<b>993,2</b>	3,2	2,7	5,0	95,8%
	Patata			2,3	<b>66,4</b>	2,4	12,4	79,5%
	Pimiento/Tomate	2,0	3,5	10,0		<b>253,1</b>	2,4	93,4%
	Otros cultivos	16,6	4,6	31,1	13,9	38,6	<b>22,7</b>	17,8%
FIABILIDAD		84,9%	95,4%	94,5%	79,5%	85,3%	53,4%	
Fiabilidad global		90,2%						
Fiabilidad media		82,2%						
Precisión media		80,1%						

El proceso basado en la fotointerpretación asistida ha arrojado mejores resultados para los cultivos de alfalfa, cebolla, melón o sandía, patata y pimiento o tomate. La clasificación multiespectral aporta una identificación fiable del maíz, y sirve además, para asignar los cultivos presentes en las parcelas donde no se han podido aplicar técnicas de fotointerpretación.

A partir de estos criterios, se ha obtenido el mapa de cultivos herbáceos regados durante el verano de 2009. Este mapa ha sido sometido a un proceso de validación, utilizando la muestra de campo obtenida específicamente para este fin durante el otoño de 2009 (ver apartado 3.2.2.ii). El resultado (Tabla 21) muestra un grado de acierto general muy elevado, con una fiabilidad global que supera el 95%.

En las figuras 31 y 32, se recogen un diagrama de flujo y un esquema de síntesis, descriptivos del proceso metodológico para la determinación de las superficies ocupadas por cultivos herbáceos de verano dentro del ámbito de estudio.



Tabla 21. Matriz de confusión para el mapa resultante de la integración de las diferentes aproximaciones para la identificación de cultivos

		CAMPO							PRECISIÓN
		Alfalfa	Cebolla	Maíz	Melón / Sandía	Patata	Pimiento / Tomate	Otros cultivos	
CLASIFICACIÓN FINAL	Alfalfa	133,3							100,0%
	Cebolla		318,0	3,5					98,9%
	Maíz			205,4	5,2				97,5%
	Melón / Sandía		10,8	0,0	1.027,6		10,9	4,6	97,5%
	Patata					73,5		7,0	91,3%
	Pimiento / Tomate				10,7		262,4	1,1	95,7%
	Otros cultivos	2,6	1,4	4,5	7,6	9,0	19,1	28,8	39,5%
FIABILIDAD		98,1%	96,3%	96,3%	97,8%	89,1%	89,7%	69,4%	
<b>Fiabilidad global</b>		95,44%							
Fiabilidad media		90,95%							
Precisión media		88,63%							

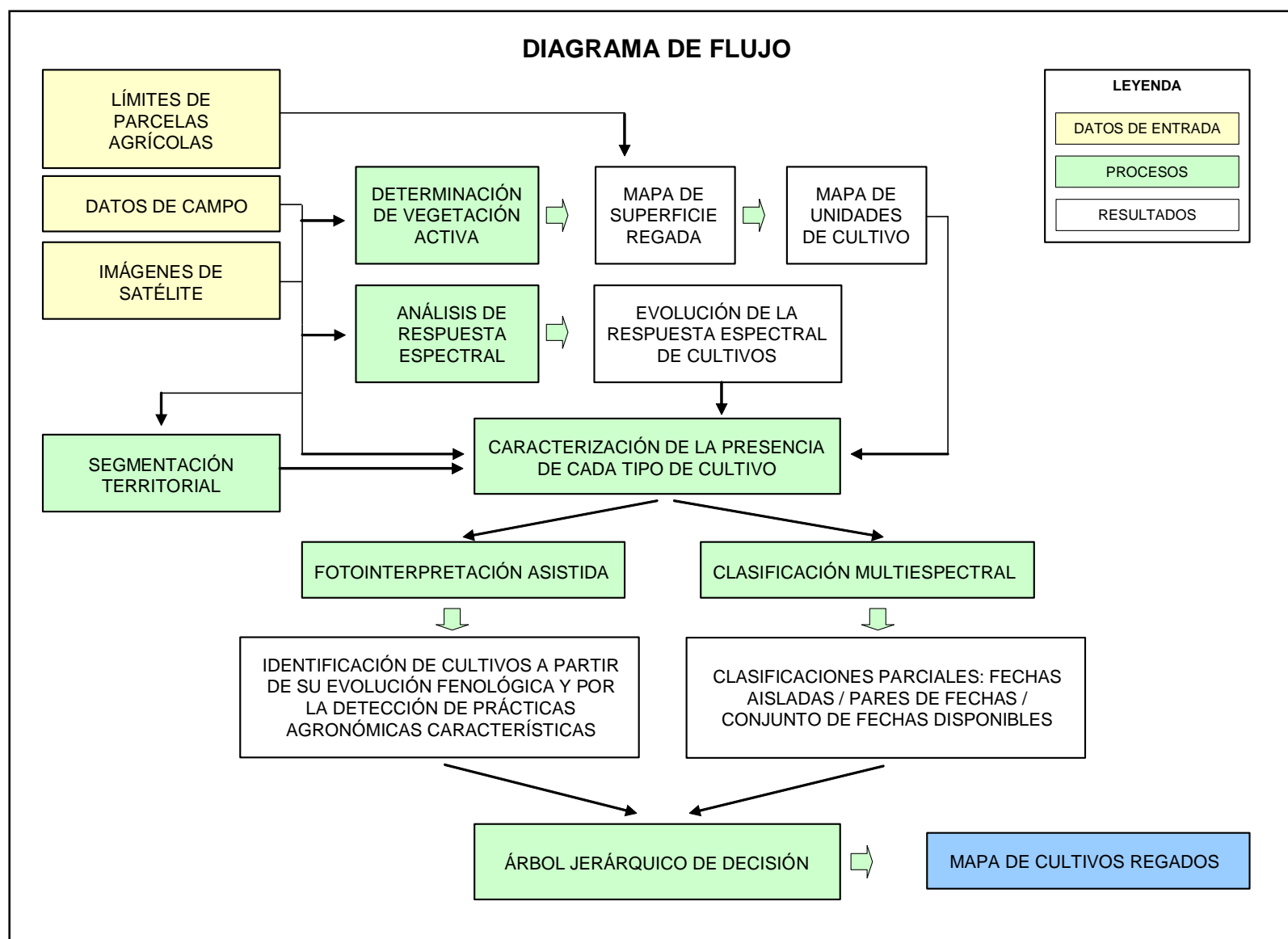


Figura 31. Diagrama de flujo del proceso metodológico para la identificación de cultivos herbáceos regados durante el verano

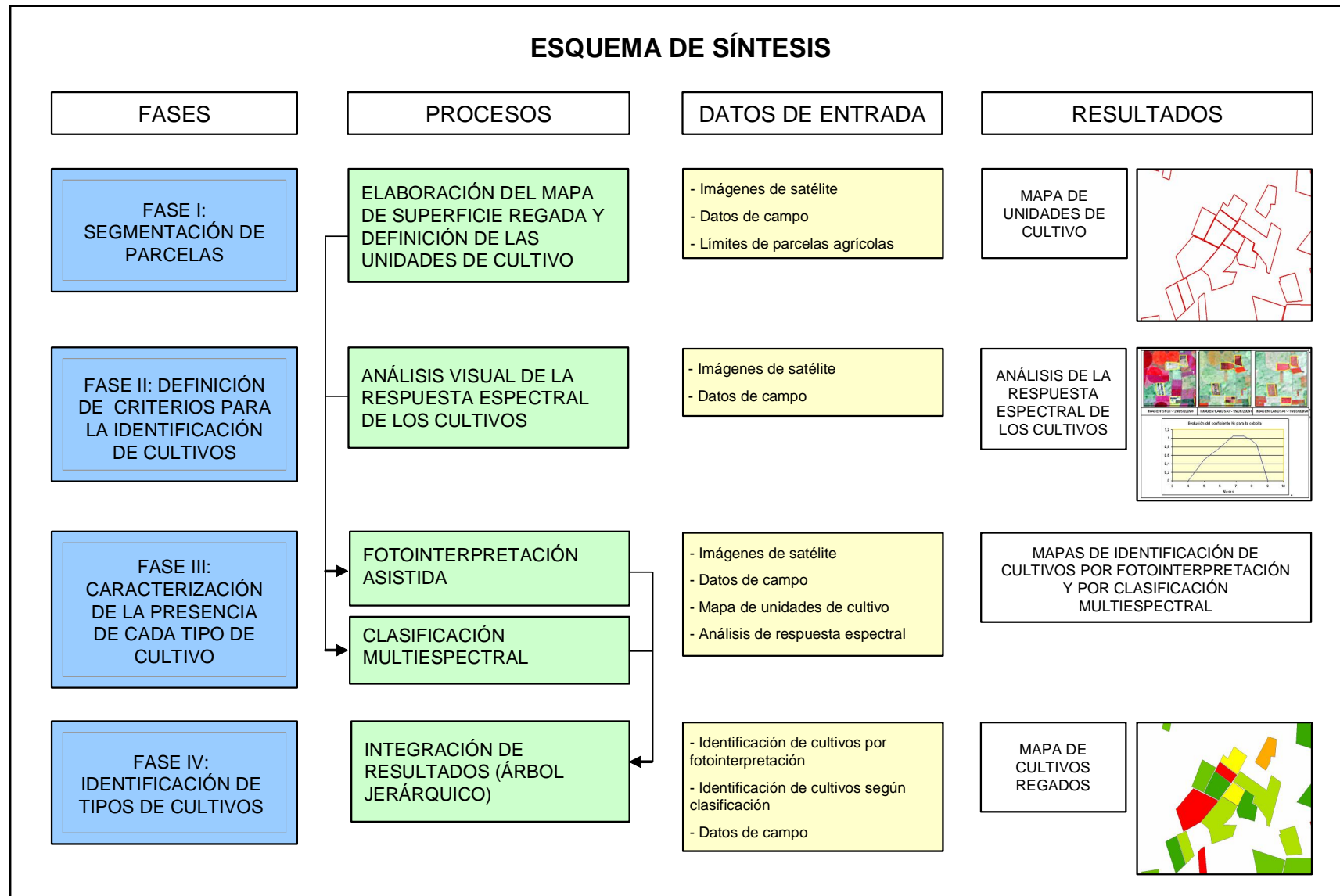


Figura 32. Esquema de síntesis del proceso metodológico para la identificación de cultivos herbáceos regados durante el verano

## 4.2. Distribución de cultivos herbáceos regados en primavera

Los cultivos de primavera son tradicionales en la cultura agrícola de la zona, especialmente los cereales de invierno, contando con una extensa presencia y siendo habitualmente cultivados en secano (ver Apéndice A.2.2.1). Sin embargo, en la actualidad, los cultivos de primavera aparecen tanto en secano como en regadío.

En el caso del cereal, las dotaciones de agua empleadas son muy variables, lo cual complica la detección de las parcelas regadas. Además, las condiciones climáticas son menos severas que las existentes en verano, con precipitaciones mucho mayores y necesidades hídricas de riego más reducidas. Ambos factores motivan que la aproximación necesaria para la discriminación de cultivos herbáceos regados durante la primavera resulte diferente a la presentada anteriormente para los cultivos de verano.

La **segmentación de los cultivos** regados durante la primavera identifica tres tipos de cultivos principales, para los que resulta necesario plantear metodologías distintas:

- El cereal de invierno, que resulta el cultivo mayoritario en la zona. Dentro de las diferentes especies, la cebada es sin duda la más extendida, seguida a mucha distancia por el trigo y en menor medida la avena. Debido a las similitudes fenológicas y fenotípicas entre los tipos de cereales cultivados en la zona, y a la ausencia de diferencias significativas en las dotaciones usadas para cada especie, su análisis se ha englobado en una metodología común donde no se distingue entre diferentes tipos de géneros dentro de la familia de los cereales.
- Las leguminosas para forraje, principalmente representadas por el guisante, que muestran diferencias de fenología claras en relación al cereal, aunque las dotaciones utilizadas resultan de una magnitud similar.
- El ajo, que tradicionalmente ha sido cultivado en secano en la zona, aunque durante la campaña de campo se ha observado que en la actualidad es regado en todos los casos, siempre utilizando sistemas de aspersión.

La teledetección resulta una fuente de datos apropiada para la estimación de variables relacionadas con la existencia de riego en primavera y se ha empleado en la construcción de los distintos procesos metodológicos. El enfoque general se ha basado en el proceso digital de la serie de imágenes de los satélites Landsat 5 y SPOT 5, coincidentes con la época de riego (componente multiespectral y multitemporal) y, usando como datos de apoyo, tanto la “*verdad terreno*” obtenida en la campaña de campo, como datos auxiliares relacionados con la distribución previa de cultivos en cada parcela cultivada durante la primavera (componente multitemporal y multicriterio).

No obstante, las metodologías de trabajo seguidas para la identificación del riego en cada uno de estos tres tipos de cultivos presenta ciertas variaciones.

Por un lado, la aproximación seguida para la detección de los cultivos de **ajo** se ha basado en el empleo de técnicas de fotointerpretación asistida. La cubierta vegetal de este cultivo no resulta demasiado importante, por lo que los valores de reflectancia registrados en las imágenes son relativamente reducidos, sobre todo si se comparan con los correspondientes a otros cultivos con los que coinciden temporalmente. Sin embargo, el análisis de la respuesta espectral del cultivo a lo largo de su campaña de riego posibilita, en la mayoría de los casos, su discriminación a partir del análisis visual de composiciones en color en procesos de *fotointerpretación asistida*.

Por otro lado, y en contraposición al caso del ajo, los **cereales de invierno** y las **leguminosas** en regadío han sido discriminados a partir del cálculo de *índices de vegetación* mediante el proceso digital de las imágenes de satélite. Para ambos casos, se ha procedido a una primera fase común en la que se han identificado y delimitado las parcelas cultivadas durante la primavera de 2009. Posteriormente, se han aplicado metodologías diferentes para definir las superficies regadas de ambos tipos de cultivos.

La identificación de zonas cultivadas durante la primavera de 2009 se ha llevado a cabo mediante el cálculo de índices de vegetación para todas las imágenes de la campaña, utilizándose los algoritmos de NDVI (*Índice normalizado de diferencia de vegetación*) y de LMI (*Índice de humedad de hoja*).

El proceso orientado a la delimitación aproximada de las superficies cultivadas ha sido de tipo empírico, basándose en la integración de composiciones en color infrarrojo y mapas de índice de vegetación (ver apartado 4.1.2). Mediante interpretación visual sobre las composiciones en color se determinan valores umbral de NDVI y LMI que permiten discriminar las áreas cubiertas de vegetación de las que no lo están. Estos límites de separación se han calculado de forma independiente para cada imagen y área de la segmentación territorial sobre la que se basó el diseño de la campaña de campo; y se han validado con la verdad terreno obtenida en esta campaña.

La existencia de cultivos de cereal con muy poco desarrollo ocasiona que aparezcan parcelas en barbecho con valores similares de índice de vegetación. Algunas de estas parcelas han quedado incluidas dentro del mapa de cultivos de primavera, lo cual no supone ningún problema para el cumplimiento de los objetivos de la investigación, ya que en ningún caso pueden llegar a ser confundidas con parcelas en regadío.

Las superficies discriminadas como cultivadas en cada una de las fechas disponibles han sido unidas espacialmente en un único mapa que representa las áreas con actividad fotosintética existentes durante la primavera de 2009. Las parcelas cultivadas de ajo o de cultivos herbáceos regados durante el verano pero ya presentes en la primavera (como la alfalfa) han sido eliminadas de este mapa.

A partir de esta representación, se ha llevado a cabo un proceso análogo al descrito dentro del apartado 4.1.2, dirigido a la obtención de un mapa de superficie cultivada durante la primavera de 2009 y consistente en la aplicación sucesiva de dos fases:

- i) enmascaramiento de zonas de vegetación natural y de parcelas identificadas como cultivos de alfalfa o prados de ciclo largo, dentro del análisis realizado para los cultivos herbáceos regados durante el verano y
- ii) adecuación del mapa ráster obtenido a una cartografía vectorial de mayor detalle espacial mediante su combinación con el catastro de parcelas de rústica y posterior revisión.



Figura 33. Proceso de obtención del mapa de superficie cultivada en primavera de 2009.

Figura superior izquierda: composición en falso color elaborada a partir de una imagen SPOT de 17 de mayo; figura superior derecha: aparece superpuesto en color amarillo el mapa ráster de cultivos de primavera; figura inferior: mapa de superficie cultivada en primavera (en color amarillo) sobre imagen Landsat de 28 de mayo.



Cada elemento gráfico del mapa representa una parcela del catastro o la delimitación de una parte de ella, lo que además de mejorar el aspecto visual del mapa de cultivos y garantizar una mayor precisión, permite que la representación gráfica del mapa quede ajustada a las unidades de gestión agrícola de referencia.

Este mapa ha servido de base para la realización de procesos de asignación de la existencia de riego, para los que se ha tomado como unidad de decisión la parcela catastral cultivada durante la primavera. A partir de este punto, se han seguido metodologías diferenciadas para la discriminación del riego en cultivos de cereal y en cultivos de leguminosas, pudiéndose ya presentar las tres metodologías para la discriminación de cultivos regados en primavera.

#### 4.2.1. Discriminación de ajo en regadío

La metodología que ha mostrado mejores resultados para la identificación de las parcelas cultivadas de ajo ha sido el empleo de técnicas de fotointerpretación asistida, similares a las descritas en el apartado 4.1.3.1.

El ajo presenta un fenotipo y unas condiciones de cultivo muy similares a la cebolla, plantándose en hileras y dejando un espacio considerable entre filas para permitir el desarrollo radicular de las plantas. Si a este esquema de cultivo se le suma un desarrollo foliar reducido del cultivo y el mayor crecimiento de la hoja en el eje vertical respecto al horizontal, obtenemos los factores que explican que tenga una fracción de cubierta foliar sobre el terreno reducida, siendo la menor de entre todos los cultivos herbáceos regados en la zona.



Figura 34. Cultivo de ajo

La relación directa existente entre cubierta vegetal e índices de vegetación derivados de las imágenes de satélite explica que la respuesta observada sea de poca intensidad en las parcelas de ajo. Solamente en el momento de máximo crecimiento y verdor del cultivo, éste adopta valores mayores de índice, lo que a su vez se plasma en tonos más cercanos al color rojo dentro de las composiciones.

La presencia de los ajos empieza a ser identificable durante el mes de mayo, alargándose por lo general su respuesta más tiempo que la de los cereales. Este desfase, junto con la diferencia de humedad observable en las imágenes como consecuencia del elevado encharcamiento que se produce en las zonas que han sido

regadas más recientemente en cada parcela, ayudan considerablemente a la identificación de las parcelas de ajo. La mayor humedad del suelo se traduce en tonos más oscuros en las composiciones en color infrarrojo, muy sensibles a la presencia de agua en el terreno.

De esta forma, la discriminación de estos cultivos se ha basado en el empleo de algoritmos de distancia (sobre las bandas del rojo, infrarrojo próximo e infrarrojo medio) para la identificación de parcelas candidatas, y una posterior revisión visual de estas parcelas a partir de la serie temporal de imágenes disponibles.

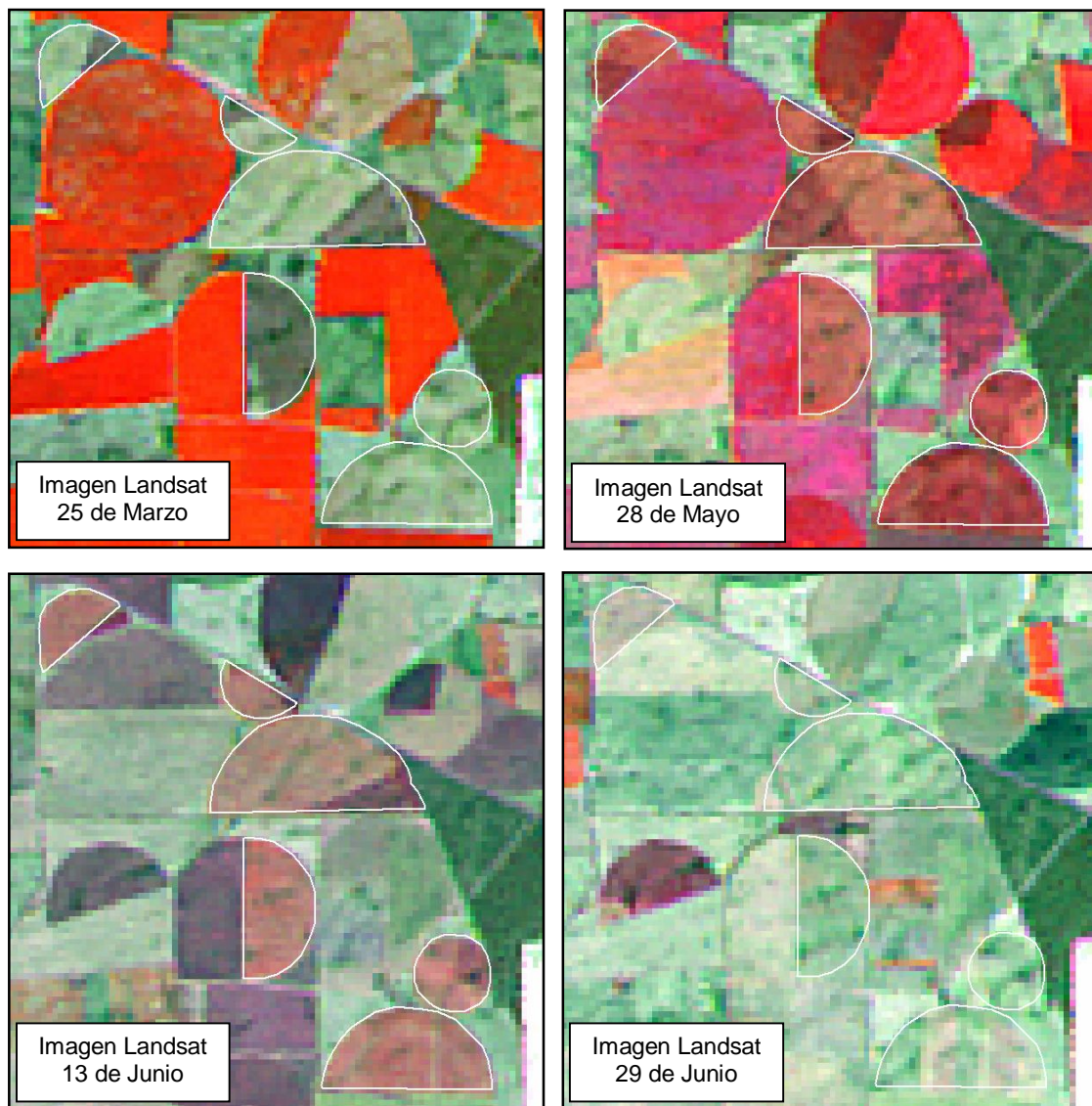


Figura 35. Evolución visual de la respuesta espectral de parcelas de ajo.

La fenología del cultivo así como las diferencias de respuesta entre suelos húmedos (regados en fecha próxima a la adquisición de las imágenes) y suelos secos, permiten la identificación del ajo en relación a otros cultivos de primavera.



#### 4.2.2 Discriminación de leguminosas en regadío

Los cultivos de leguminosas, representados por el guisante y, en mucha menor medida, por otras forrajeras, presentan un ciclo de crecimiento que permite su diferenciación del cereal así como de otros cultivos de primavera.

La discriminación de las leguminosas se ha basado en el análisis de cambios entre las imágenes de final de marzo y final de mayo, que resulta especialmente brusco para este tipo de cultivos, que pasan de encontrarse en la fase incipiente de su ciclo a presentar una cubierta vegetal casi completa del terreno. Además, en su fase final de desarrollo fenológico su actividad fotosintética resulta muy elevada, siendo un cultivo que se cosecha en verde cuando aún se encuentra húmedo, lo que se traduce en una respuesta espectral intensa en las imágenes de satélite de final de mayo y principios de junio.

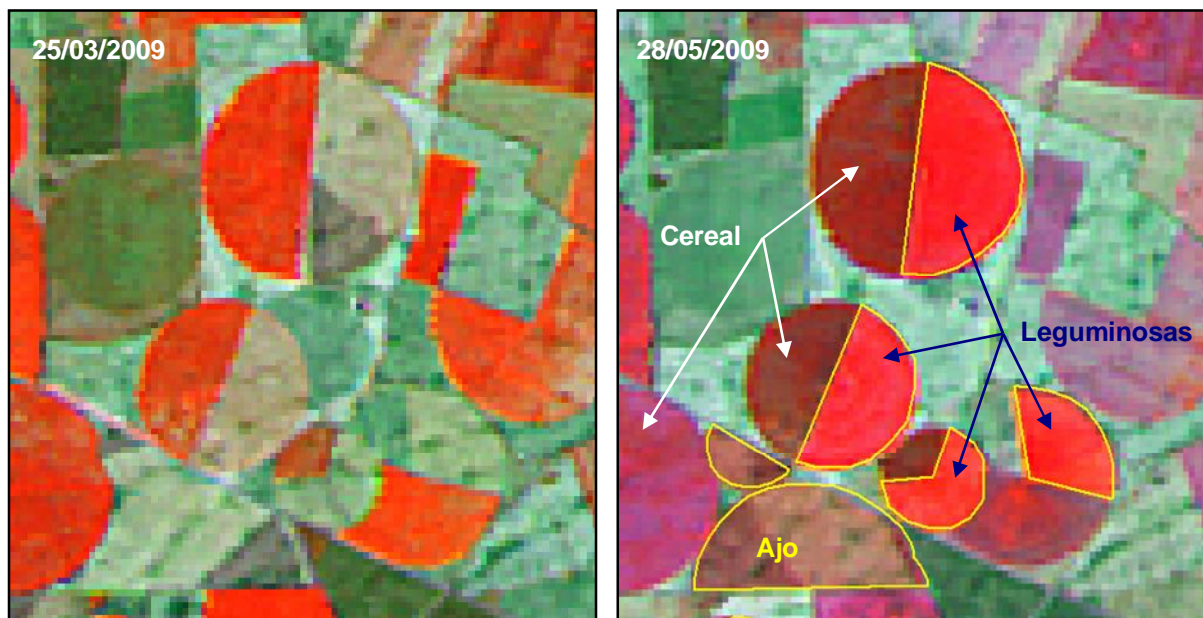


Figura 36. Ejemplo de evolución fenológica de cultivos de leguminosas observados en campo

El algoritmo de análisis de cambios se ha basado en la resta de los índices de vegetación de las dos fechas de referencia, localizando posteriormente las parcelas en donde hayan concurrido tres factores discriminantes:

- i) valores elevados de índices de vegetación y humedad en las imágenes de satélite de final de mayo o principio de junio,
- ii) cambios bruscos en los valores de los índices entre las fechas de finales de marzo y mayo (asociados al ciclo de crecimiento del cultivo) y
- iii) cambios bruscos entre su momento de máximo desarrollo, generalmente a finales de mayo y la siguiente imagen disponible, donde el cultivo ya ha sido recogido quedando un suelo desnudo sin presencia de rastros.

### 4.2.3. Discriminación de cereal en regadío

El cereal es un cultivo con gran tradición en la Región Manchega (ver Apéndice 2.2.1), y que se adapta perfectamente a las condiciones climáticas y edáficas de la zona. Sin embargo, en la actualidad muchas explotaciones de cereal son regadas, frecuentemente dentro de rotaciones multianuales de cultivos, obteniéndose como consecuencia, un aumento significativo en el rendimiento de las cosechas.

Los aportes adicionales de agua resultan importantes para el cultivo por dos aspectos principales: por un lado, el agua es el factor limitante durante la fase de desarrollo del cultivo y de formación del grano, y por otro, la existencia de periodos de sequía unidos a episodios de elevadas temperaturas durante el final de la primavera pueden ocasionar efectos desfavorables sobre las cosechas de gramíneas, que pueden ser limitados mediante riegos de apoyo o de emergencia.

La existencia de una relación entre la existencia de riego y mayores densidades de cubierta vegetal y tasas de actividad fotosintética del cultivo, posibilita que los datos de reflectancia registrados en las imágenes de satélite sean un indicador válido para la detección de las diferencias producidas en las características de los cereales a causa del efecto del riego.

El aumento de producción de los cereales por la aplicación del riego, queda recogido en los índices de vegetación a través de dos parámetros agronómicos directamente relacionados con los datos de teledetección:

- La evolución de la fracción de cubierta vegetal ( $f_c$ ) y del coeficiente basal de cultivo ( $k_{cb}$ ) muestra una elevada correlación con la evolución temporal del NDVI extraído de una serie temporal de imágenes a lo largo del ciclo del cultivo de cereal.
- La fracción de radiación aprovechable por las plantas para su fotosíntesis (fAPAR) aumenta de forma directa según lo hace el NDVI medido sobre el cultivo.

De esta forma, la hipótesis de partida en la que se basa la aproximación propuesta es que para dos cultivos semejantes, uno de ellos regado y el otro no, deberían apreciarse diferencias discriminables en los valores medios de los índices de vegetación (extraídos de imágenes de satélite de suficiente resolución espacial), siempre y cuando el efecto del riego haya producido diferencias en las características del cultivo.

No obstante, esta afirmación no puede extrapolarse de forma directa y conjunta a un territorio tan amplio y con condiciones ambientales y culturas agronómicas tan variadas como las que se dan en la Llanura Manchega. Por un lado, cultivos situados en zonas separadas entre sí, suelen presentar comportamientos diferentes debido a variaciones en los ciclos fenológicos o al uso de variedades mejor adaptadas a las condiciones climáticas locales. Por otro lado, el riego no es la única práctica agronómica que produce mejoras apreciables en el estado del cultivo, ya que una adecuada fertilización y la

aplicación de tratamientos fitosanitarios tienen una influencia considerable sobre el estado del cultivo.

En relación al riego, se conoce que en La Mancha las dotaciones de agua usadas para el cereal presentan oscilaciones muy importantes en un gradiente que oscila entre el riego de emergencia (150-200 mm) y el riego intensivo (por encima de 2.000 mm), pasando por diversos grados de riego de apoyo.

Por estos motivos, en las campañas de campo han podido localizarse explotaciones de secano bien cuidadas, que presentan un estado mejor que otras parcelas donde el cereal ha sido regado, aunque seguramente las dotaciones empleadas hayan sido reducidas.

Teniendo en cuenta este escenario, la discriminación de la existencia de riego va a apoyarse en criterios de análisis espacial centrados en:

- **la segmentación territorial** del área de estudio en zonas donde se aprecia un comportamiento uniforme en la evolución del desarrollo de los cultivos de cereal a lo largo de la primavera.
- la determinación del **historial del tipo de cultivo existente** en campañas anteriores para cada una de las parcelas cultivadas de cereal durante 2009. Este análisis tiene en cuenta una mayor posibilidad de encontrarse en regadío para aquellas parcelas asociadas a un ciclo de rotación de cultivos intensivos en el que aparezcan riegos de herbáceos de verano o por el contrario, la mayor probabilidad que tiene una parcela de no haber recibido agua cuando en la serie histórica disponible no se observe riego en ningún verano y la explotación se encuentre en una rotación de cultivos típica de los secanos, con alternancia de barbechos.

La decisión de asignación a la categoría de riego se lleva a cabo por separado para cada una de las zonas procedentes de la segmentación y se sustenta y es posteriormente validada a partir de los datos recogidos durante la campaña intensiva de campo.

La elaboración del *Mapa de cereal en regadío* se basa en un sistema de asignación, ajustado a partir de los datos recogidos en campo a lo largo de toda la campaña de riego, y diseñado a partir de la caracterización de cada parcela en función de su historial de riego y de la rotación de cultivos existente en años anteriores. La toma de decisión acerca de la discriminación como regada, de una parcela cultivada durante la primavera, se ha realizado mediante el análisis de la evolución temporal de los valores medios por parcela de los índices de vegetación y humedad.

#### 4.2.3.1. Segmentación territorial para la asignación de riego

La segmentación territorial se ha basado en la integración de varios factores diferentes, con el objetivo de poder aplicar la metodología de trabajo sobre zonas donde los cultivos presenten ciclos de desarrollo uniformes y las variables estadísticas que conforman la

base del proceso de toma de decisión puedan considerarse como extrapolables al conjunto del área:

- La fenología de los cultivos de cereal, determinada a partir de observaciones y medidas realizadas a lo largo de las visitas realizadas durante la campaña de campo de primavera. Dentro del área de estudio, el ciclo de maduración del cultivo presenta variaciones apreciables, habiéndose observado durante 2009 una diferencia superior a las dos semanas entre la época de inicio de cosecha en la zona oeste (entorno de Daimiel) y en la zona situada al noreste (área de San Clemente), debido a que esta última se encuentra a mayor altitud y presenta una mayor precipitación media al mismo tiempo que una menor demanda evaporativa.
- La densidad de explotaciones de riego existentes de acuerdo a los datos recogidos en campo, basándose en que las diferencias en los niveles piezométricos dentro de los acuíferos motivan la existencia de zonas con diferente accesibilidad al agua. Dado el escaso margen de beneficio marginal que proporciona el cultivo de cereal, el riego en zonas donde el agua ha de ser bombeada desde mayor profundidad resulta menos probable.
- La distribución de las imágenes de satélite sobre el territorio, ya que para poder aplicar la metodología de forma uniforme, los datos a utilizar deben ser los mismos para cada una de las zonas. En este sentido, la necesidad de una continuidad en las fechas de la cobertura de imágenes SPOT ha obligado a un mayor detalle en el proceso de segmentación.

Como resultado del proceso, los acuíferos sobreexplotados de la Llanura Manchega han quedado divididos en 11 zonas donde el cereal presenta un comportamiento comparable, lo que facilita la identificación de las diferencias debidas a la presencia de riego.

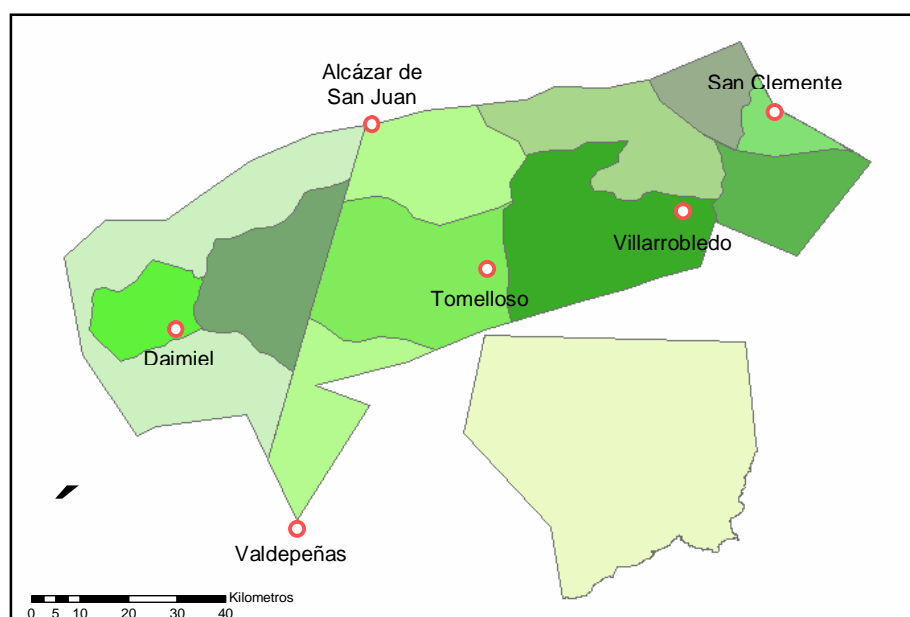


Figura 37. Segmentación del territorio para la discriminación de riego en cereal.

De esta manera, se pretende reducir la variabilidad que los factores anteriormente descritos introducen tanto en el comportamiento del cultivo como en la caracterización de su estado, concretando la aplicación de la metodología a zonas mas homogéneas, de forma que donde la determinación del riego se aproxime con mayor fiabilidad.

#### *4.2.3.2. Criterios para la determinación de la existencia de riego*

El proceso seguido para la determinación de la presencia de riego se resume como una asignación de las parcelas del mapa de cereal cultivado en 2009 a las categorías de “*cereal regado*” o “*cereal en seco*”, mediante la aplicación de un sistema guiado de toma de decisión.

El método de discriminación del riego se basa en el uso de umbrales de asignación. Estos valores umbral se definen a partir de los valores medios por parcela de los diferentes índices de vegetación y se ajustan tomando en consideración criterios relacionados con el historial de riego de los cultivos que hayan existido en cada parcela en los años anteriores.

Los *criterios*, o *factores de aptitud*, empleados han sido representados mediante mapas, (con valores numéricos o cualitativos), que engloban al conjunto de parcelas cultivadas de cereal durante la primavera de 2009.

Estos factores de aptitud condicionan la posibilidad de que una parcela cultivada de cereal haya podido ser regada y presentan un valor medio o un único valor para cada parcela cultivada, habiéndose considerado:

- a) el valor medio de **índice de vegetación** y de índice de humedad de hoja para cada parcela, calculados para cada una de las imágenes Landsat de final de marzo y final de mayo y para las imágenes SPOT de la segunda quincena de mayo o de principio de junio.
- b) el tipo de **sistema de rotación de cultivo** detectado en cada parcela, que puede presentar un mayor o menor grado de intensidad, o por el contrario adecuarse a un sistema tradicional de seco.

En este punto, también se ha tenido en cuenta la existencia de riego en alguno de los veranos para los que se dispone de imágenes de satélite (periodo 1984-2008). Este mapa recoge el conjunto de parcelas para el que se puede afirmar, con cierta seguridad, la existencia de infraestructura para el riego de cultivos herbáceos. Dada su amplitud, y considerando que dentro de este periodo se ha producido la máxima extensión del riego de herbáceos en la zona de estudio (ver Apéndice A.2.2.2), las parcelas donde no se haya apreciado riego en ninguno de los años tienen, en su conjunto, una menor probabilidad de encontrarse en regadío.

El sistema de asignación de riego se basa en la definición, para cada unidad territorial, de valores umbral en los índices de vegetación para la separación entre parcelas regadas y

no regadas. Los valores umbrales varían dependiendo de cuales hayan sido los tipos de cultivos existentes en los años anteriores, con objeto de tener en cuenta el tipo de rotación de cultivo existente en cada explotación.

a) Los valores registrados en los **índices de vegetación** medidos sobre cultivos herbáceos están directamente relacionados con la densidad del cultivo y con la cantidad de radiación fotosintéticamente aprovechable que toman las plantas, aumentando ambos parámetros con la presencia de riego, al eliminarse el principal factor limitante para el crecimiento del cultivo que generalmente es el acceso al agua. Sin embargo, esta relación varía según evoluciona la fenología del cultivo, por lo que hay que tener en cuenta que la capacidad de discriminación de la existencia de riego a partir de los índices de vegetación y humedad resulta diferente en cada fecha:

- Las imágenes de final de marzo y principio de abril proporcionan información de menor interés para la determinación de la existencia de riego que las adquiridas en la fase de final del periodo de desarrollo del cultivo. A estas alturas de su ciclo fenológico, la influencia del riego todavía no es suficiente para producir diferencias en su estado. La alta variabilidad que se observa en la respuesta espectral de las parcelas deriva de las diferencias en la densidad de siembra y de la existencia de variedades de desarrollo más rápido. Por este motivo, se considera que el índice de vegetación calculado para estas fechas está directamente relacionado con la cubierta vegetal del cultivo, que suele ser superior en parcelas en regadío frente a parcelas de secano. Cuanto mayor sea su valor medio de índice de vegetación en estas fechas, mayor es su probabilidad de que una parcela haya sido regada. Sin embargo, sólo valores muy elevados pueden asociarse con seguridad a la presencia de riego.
- Las imágenes de mitad y finales de mayo, resultan más adecuadas para la determinación de la presencia de riego en una parcela. En estas fechas, el efecto producido por el riego sobre las características generales del cultivo es apreciable, lo que se correlaciona con los índices establecidos a partir de las medidas de reflectividad de la vegetación.

Normalmente, la incidencia del riego se traduce en dos factores que presentan un especial interés para su caracterización a través de los índices de vegetación y humedad: por un lado, un aumento del coeficiente basal del cultivo a causa de la reducción del estrés hídrico que sufre la planta y por otro, una prolongación de su periodo de crecimiento, retrasándose la fase de agostamiento del cultivo previa a la cosecha al menos una semana en relación a los cultivos en secano. Ambos factores se relacionan de forma directa con la respuesta medida en los índices extraídos en la fase final del cultivo y han sido empleados para discriminar las parcelas en regadío de los cultivos de cereal en secano.

Para la determinación de la presencia de riego en una parcela se han utilizado diferentes valores umbral en los índices de vegetación y humedad dependiendo del ciclo previo de tipos de cultivos existentes en cada parcela. La metodología para la determinación de riego se ha aplicado por separado para cada una de las zonas definidas en la segmentación.

**b)** La caracterización del ciclo de cultivo se basa en la **rotación de cultivos** habitual en la zona, consistente en la alternancia a lo largo de una serie de años de varios tipos de cultivos complementarios para permitir un aprovechamiento máximo de la tierra y aumentar su productividad o, al menos, evitar que ésta se reduzca. En estas alternancias de cultivos se suelen intercalar los cultivos puramente productivos (cereal en primavera y herbáceos de regadío en verano) con periodos de barbecho para permitir que la tierra descanse o, en rotaciones más intensivas, con cultivos de leguminosas, fijadoras de nitrógeno y que aumentan la disponibilidad de nutrientes en el suelo.

El análisis de las rotaciones de cultivo ha sido posible a partir de la elaboración de mapas de cultivos herbáceos en regadío durante los veranos de los años para los que se cuenta con imágenes de satélite. La disponibilidad de esta información ha permitido caracterizar varios tipos de rotación de cultivos que varían dependiendo del grado de intensificación en el uso agrario que representan, y dentro de los cuales aparece el cultivo de cereal alternado con cultivos regados durante el verano y años de barbecho. Se ha analizado el periodo 1984-2009 (ver Apéndice A.2.2.2), poniendo especial énfasis en los últimos cinco años, lo que ha permitido la agrupación de las parcelas donde aparecen cultivos de cereal en 2009 según las siguientes categorías (ordenadas de menor a mayor grado de intensificación agraria):

- Rotación de cultivos de secano: es aquella que sigue un patrón clásico en el que se alterna el cultivo de dos campañas de cereal en secano con un año de descanso de las tierras en barbecho. Dentro de estas explotaciones, se distingue si se ha observado, o no, la presencia de riego en alguno de los veranos en el periodo 1984-2003. Este criterio aporta información acerca de la existencia de infraestructura de riego, aunque no haya sido empleada en los últimos años.
- Rotación de cultivos en riego: se incluyen las explotaciones donde en un periodo que comprende los cinco años previos a la campaña estudiada (2004-2008) se aprecia riego durante alguno de los veranos, y en donde en los años restantes se alternan cultivos de primavera y barbechos. Para este tipo de explotaciones debe considerarse una mayor posibilidad de existencia de riego, ya que existe una infraestructura en condiciones de uso.
- Rotación de cultivos de primavera en riego: se incluyen las explotaciones donde en el periodo que comprende los últimos tres años (2007-2009) se aprecia riego evidente de cereales u otros cultivos de primavera en los dos años previos. Este tipo de explotaciones presentan una alta posibilidad de riego, ya que resulta

necesario regar, aportando agua y fertilización para poder mantener la producción si no se permite la recuperación del terreno mediante barbecho.

- Rotación de cultivos en riego intensivo: se incluyen las explotaciones donde en los últimos tres años (periodo 2007-2009) se aprecia riego en cultivos herbáceos de verano en los dos o al menos uno de los dos años previos y en las que no se ha utilizado el barbecho.

Resulta frecuente observar el cultivo de leguminosas en alguno de los años del ciclo como fase de aporte de nitrógeno para el terreno, aunque también aparecen gran número de explotaciones donde se ha cultivado herbáceos regados en verano en 2007 y 2008 y se introduce un cultivo de primavera en el ciclo como fase de descanso. Este tipo de explotaciones presentan una elevada posibilidad de riego.

Tradicionalmente, en las zonas de secano, se alterna el **cereal (C)** con el **barbecho (B)** en ciclos de tres años: dos de cereal seguidos de uno de barbecho (ciclos C-C-B o B-C-C), si bien, a veces, se alterna un año de cada (B-C-B o C-B-C).

En las zonas de regadío intensivo podemos encontrar fórmulas de cultivo más intensivas en las que no se suelen intercalar periodos de barbecho, si no que el cereal de regadío se planta todos los años (C-C-C), se alterna cada dos años con **herbáceos de verano (V)** (ciclos C-C-V o V-C-C), se siembra un año cereal y otro herbáceo de verano (C-V-C o V-C-V) o se alterna con otros cultivos de primavera como el **ajo (A)** (A-C-A o C-C-A). También resulta frecuente el uso de **leguminosas (L)** (V-C-L) para permitir la recuperación de la tierra y evitar que merme su productividad. En zonas en las que el riego es menos intensivo vuelven a utilizarse las alternancias con barbecho (B-V-C o B-C-V).

En las figuras 38, 39 y 40, se muestran, como ejemplo, tres zonas con diferentes características en cuanto a la intensidad de riego que presentan, en las que se pueden observar los diferentes sistemas de rotación de cultivos de primavera (cereal, ajo, leguminosa) y verano a lo largo de los tres últimos años (2007-2009).

La primera es una zona típica de secano, la segunda representa una pequeña zona de regadío incluida dentro de un entorno de predominio del secano, que ejemplifica la transición entre el caso anterior y el tercer caso, en el que recoge una muestra de zona con predominio del riego intensivo.

En cada una de las zonas se muestra una imagen de primavera y una de verano para cada uno de los años y sobre ellas se han marcado las parcelas en las que se ha estudiado el sistema de rotación de cultivos.

Finalmente, en la imagen de cada zona correspondiente a la primavera de 2009 se incluye dentro de cada parcela analizada, la fórmula de rotación detectada en la misma.



Ejemplo de rotación de secano con alternancia de cultivos y barbecho.

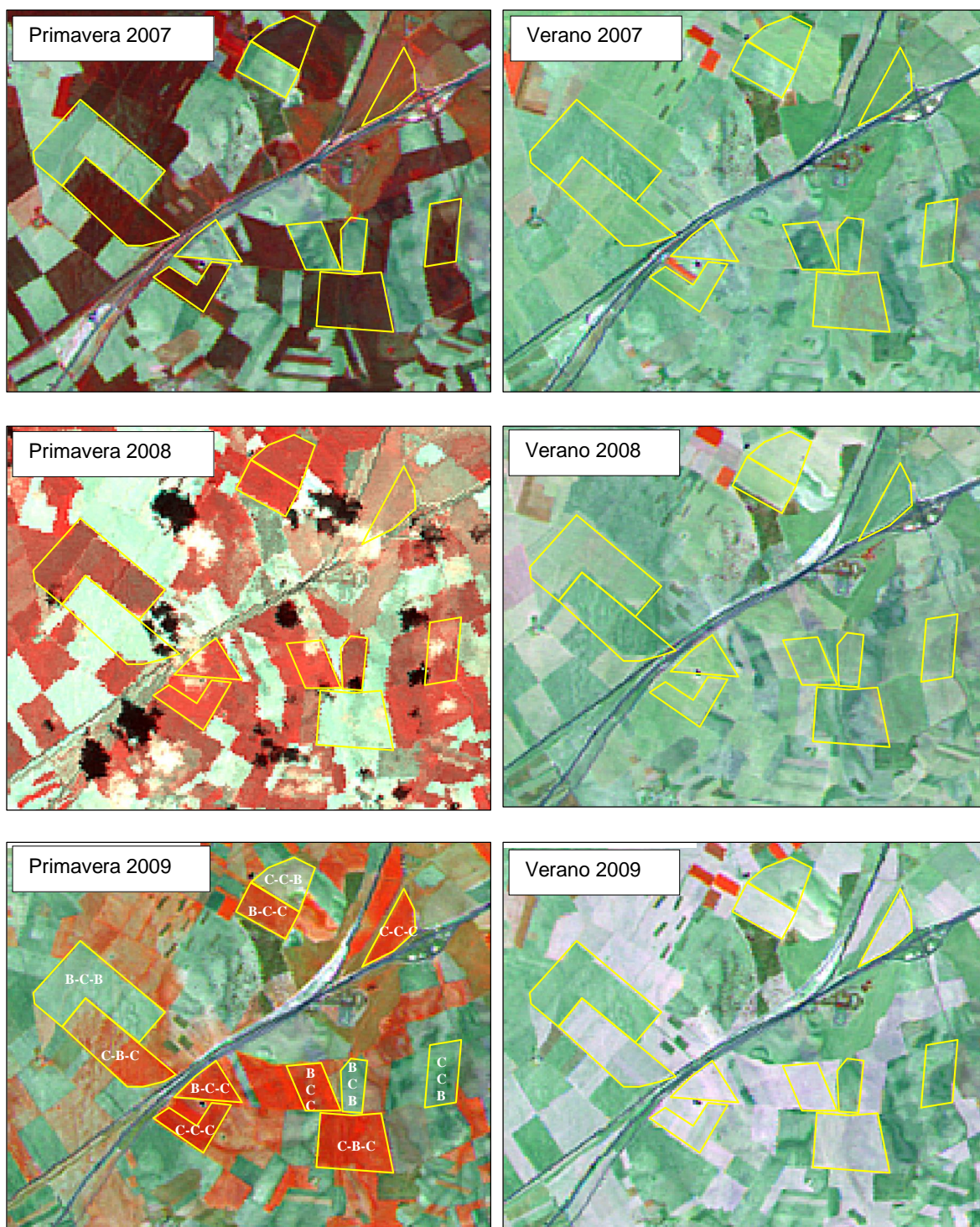


Figura 38. Ejemplos de rotaciones de cultivos con predominio del secano.

Las rotaciones más frecuentes incluyen el cultivo alterno del cereal con años de barbecho. Dado que el aporte adicional de nutrientes suele realizarse mediante fertirrigación, las explotaciones en secano suelen necesitar años de descanso dentro de un ciclo trianual de cultivo.







## Ejemplo de rotación con carácter intensivo asociada a la presencia de riego

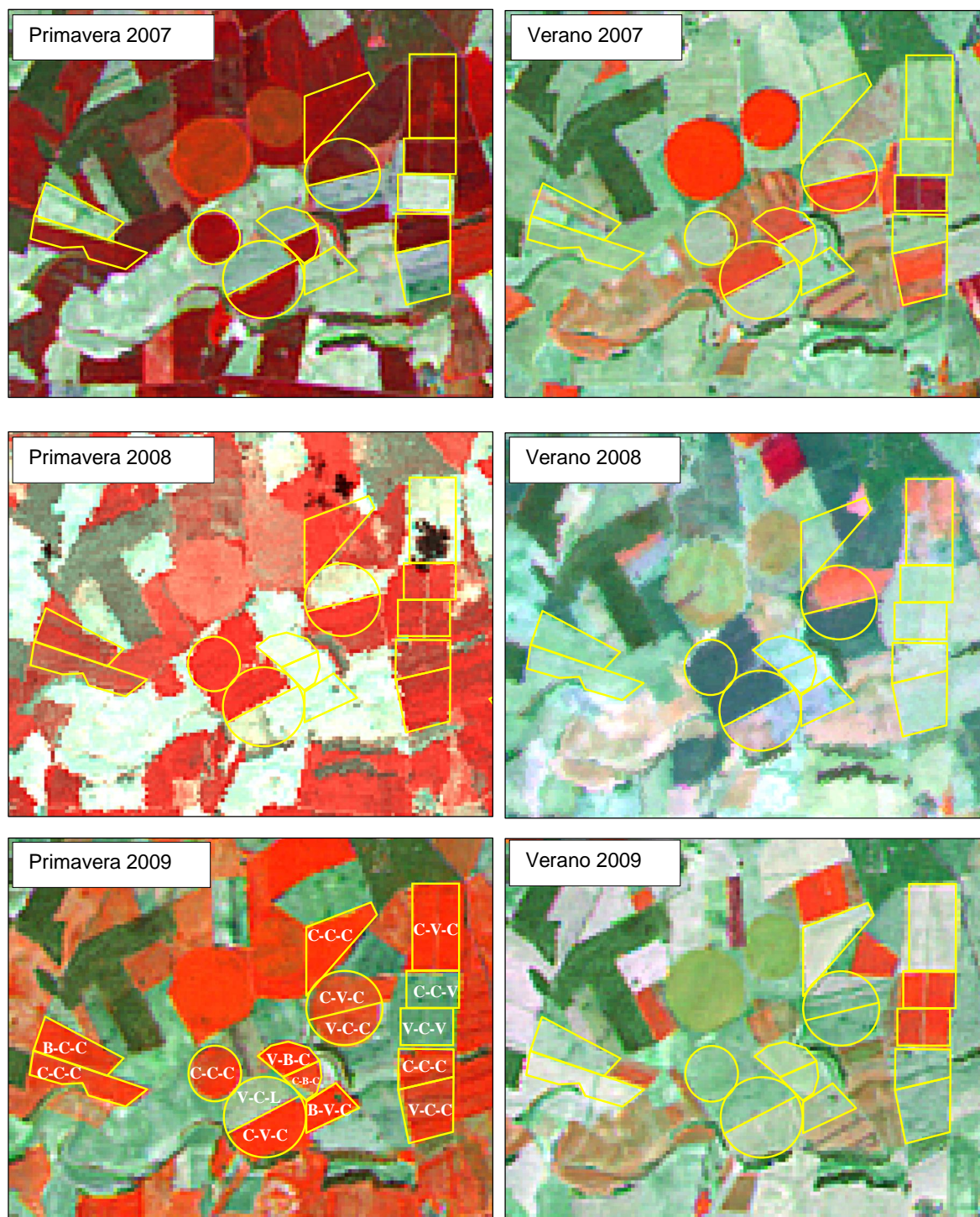


Figura 40. Ejemplo de rotaciones intensivas de riego.

En esta zona, se observan una densidad elevada de cultivos herbáceos regados durante el verano en cada una de las fechas, si bien la serie temporal de imágenes muestra como la distribución espacial de estos cultivos varía a lo largo del ciclo. El cereal y las leguminosas aparecen como cultivos de descanso del terreno. También son frecuentes las parcelas donde se han cultivado cereales durante tres años seguidos, lo cual es igualmente síntoma de intensificación agraria.

Teniendo en cuenta el aumento de la probabilidad de puesta en riego que produce cada tipo de rotación de cultivo, se han agrupado las diferentes posibilidades existentes según se recoge en la Tabla 22. Como factor adicional, se ha tenido en cuenta la distancia a las explotaciones en rotación de riego intensivo como un criterio de aumento de probabilidad de riego. Así, se han identificado las parcelas situadas en las inmediaciones de alguna de estas explotaciones para poder considerar su ubicación en zonas de mayor accesibilidad y uso del agua.

Tabla 22. Posibilidades contempladas en el análisis del historial de riego de cada parcela de cereal

Grupo	Periodo de análisis		
	2007-2008	2004-2006	1984-2003
A	Riego en alguno de los veranos	-	-
B	Posible riego en las dos primaveras	Riego en algún verano	-
C	Existencia de al menos un año de barbecho	Riego en algún verano	-
	Posible riego en las dos primaveras	Sin riego en verano	Riego en alguno de los veranos
	Próxima a riego intensivo. Posible riego en las dos primaveras.	Sin riego en verano	Sin riego en verano
D	Existencia de un año de barbecho	Sin riego en verano	Riego en alguno de los veranos
	Posible riego en las dos primaveras	Sin riego en verano	Sin riego en verano
	Dos años de barbecho	Riego en algún verano	-
E	Dos años de barbecho	Sin riego en verano	Riego en alguno de los veranos
	Próxima a riego intensivo. Existencia de un año de barbecho	Sin riego en verano	Sin riego en verano
F	Existencia de uno o dos años de barbecho	Sin riego en verano	Sin riego en verano
	Próxima a riego intensivo. Dos años de barbecho	Sin riego en verano	Sin riego en verano

Dado el elevado número de posibilidades que se plantean, éstas han sido clasificadas en seis grupos. Para cada uno de los elementos de estos grupos (*“grupos según historial de riego”*) se considera que el grado de intensificación agraria produce un aumento comparable en la probabilidad de existencia de riego.

La utilización de esta serie de criterios tiene más sentido en el acuífero de La Mancha Occidental que en el acuífero del Campo de Montiel, debido a que en este último y durante los últimos años, la superficie de cultivos regados durante el verano viene siendo prácticamente despreciable en relación al total de superficie regada durante la primavera. El riego se localiza en grandes explotaciones y en zonas de ribera de ríos y arroyos, no existiendo una cultura ligada a la rotación de cultivos entre primavera y verano. Por este motivo, el análisis de la evolución de la tipología de riego y cultivo se ha centrado en el acuífero de La Mancha Occidental (UH 04.04). Los resultados de la agrupación en función del número de parcelas y superficie ocupada para la UH 04.04 se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Agrupación según el historial de riego de cada parcela de cereal en la UH 04.04

GRUPO	Nº de parcelas	Superficie (ha)
A	2.913	17.881,3
B	694	4.711,4
C	3.486	21.158,4
D	5.405	27.732,6
E	4.291	19.035,2
F	12.232	45.607,3
TOTAL	29.021	136.126,0

#### 4.2.3.3. Delimitación de parcelas de cereal en regadío

La integración de la cartografía de superficies cultivadas, del análisis de historial de riego, de los índices de vegetación y humedad para cada fecha, y de las zonas resultado de la segmentación territorial permite la obtención de una base de datos relacional con toda la información base para la determinación de la presencia de riego.

La última fase de la metodología consiste en la integración de los datos de campo con toda la información relacionada con la existencia de riego en cada parcela, con objeto de delimitar los cereales regados.

El proceso se basa en la elaboración de un sistema de decisión en el que se establecen distintos valores umbrales para los índices de vegetación y humedad, calculados para cada zona y grupo según el tipo de rotación de riego, con objeto de discriminar entre cereales en riego y en secano. La determinación de la existencia de riego ha sido posible gracias al apoyo de los datos recogidos en campo, que han permitido caracterizar los valores umbrales, para cada índice, que sirven para diferenciar las parcelas que han sido regadas de las que no.

Los datos de campo han sido agrupados en seis categorías, de acuerdo a las observaciones y tipologías de riego realizadas a lo largo de las visitas de campo:

- *Riego*: parcelas en las que se ha constatado la existencia de riego en campo, correspondiéndose además con explotaciones donde las medidas de altura y peso efectuadas han alcanzado los valores más elevados.
- *Posible riego de apoyo (con infraestructura)*: parcelas en las que se ha observado infraestructura de riego aunque no se han apreciado evidencias de su uso. Las medidas realizadas tienden a ser mayores que en los secanos.
- *Posible riego de apoyo (sin infraestructura)*: parcelas que por su estado durante las visitas de campo y según las medidas realizadas podrían confundirse con regadíos, pero donde no se ha observado la existencia de ningún tipo de infraestructura de riego. A pesar de esto, no puede descartarse que estas parcelas hayan sido regadas con aspersores móviles u otro sistema que no haya sido apreciado en campo.
- *Secano cuidado*: parcelas que en la visita de campo donde no se ha observado ninguna infraestructura de riego y donde se han medido los valores más elevados de altura, peso y densidad de entre las parcelas de secano.
- *Secano*: parcelas cultivadas de cereal en secano
- *Secano poco cuidado*: parcelas ocupadas por cereales ralos y con poca densidad y crecimiento, donde seguramente las prácticas agrícolas han sido muy reducidas.

Las categorías de “*riego*” y “*posible riego de apoyo*” contienen la representación de las parcelas regadas dentro de la zona de estudio. En las parcelas asignadas a la clase “*riego*” se ha observado infraestructura de riego, un buen estado del cultivo y, en muchos casos, evidencias de riego (rodadas en los pívots, aspersores en uso o con señales de uso, ...).

En las parcelas con “*posible riego de apoyo con infraestructura de riego*” no se ha podido constatar que esta infraestructura haya sido empleada. Normalmente, los valores medidos tienden a ser significativamente menores que los correspondientes a riegos intensivos. Se considera que estas parcelas han sido regadas a pesar de que en algún caso el sistema de riego no haya sido empleado.

La categoría de “*posible riego de apoyo sin infraestructura*” incluye parcelas que podrían ser tanto secanos como cereales que han recibido algún tipo de riego de apoyo, aunque con carácter general se han considerado como cereales no regados. En esta categoría, se encuentran parcelas con valores de peso, densidad y altura propios de cultivos regados, y que podrían haber recibido aportes de agua, aunque este hecho no se ha podido comprobar a lo largo de las visitas de campo.

Las parcelas de “*secano cuidado*” se corresponden con parcelas sin riego pero donde muy posiblemente se han aplicado distintos tratamientos fitosanitarios y de fertilización, aunque dentro de esta categoría podría haberse introducido algún cultivo de cereal con riego de apoyo y con baja densidad de cubierta vegetal.

Dentro de las últimas dos categorías (secano y secano poco cuidado) se trabaja bajo la hipótesis de que todas las parcelas han sido cultivadas en secano.

Los datos medidos a lo largo de las tres visitas de campo (ver Tabla 24) resultan coherentes con la división efectuada a partir de las observaciones de densidad, presencia de riego y estado del cultivo.

Destaca el hecho de que entre los valores medios de la categoría de “*posible riego de apoyo*”, las parcelas sin infraestructura superan a aquellas dotadas de sistema de riego. Esto se explica por la inclusión en esta última categoría de parcelas que no hayan sido regadas ni cuidadas, a pesar de que exista una infraestructura de riego mediante pivot o aspersores fijos, lo cual rebaja la media. En el histograma de valores de esta clase se observan la mayor dispersión de entre las seis categorías analizadas.

Tabla 24. Valores medios medidos en campo para cada tipología de riego/secano

Tipología de riego	Altura media en abril (cm)	Altura media en mayo (cm)	Altura media en junio (cm)	Peso medio en junio (gr/5 espigas)
Riego	47,1	71,2	69,0	7,7
Posible apoyo (con infr.)	41,5	60,0	57,1	5,7
Posible apoyo (sin infr.)	44,0	64,5	64,2	6,2
Secano cuidado	43,9	57,0	54,2	4,7
Secano	41,2	55,2	50,4	4,4
Secano poco cuidado	30,3	48,4	44,6	3,9

A pesar de que los parámetros medidos no son indicadores directos de la existencia de riego, sí se encuentran relacionados con los efectos del riego sobre el cultivo. Se observa una diferencia evidente entre las categorías de secano y la de riego. Las categorías de posible riego de apoyo engloban a un conjunto de parcelas donde se mezclan cereales regados con bajas dotaciones y algunos cultivos de secano muy bien cuidados.

La comparación, en el ámbito de parcela, entre los valores medios de los índices de final de mayo y el peso medido para las muestras tomadas en la visita de campo de junio, muestra la existencia de una relación directa entre los datos de teledetección y el riego del cereal, ya que el rendimiento de cosecha resulta un indicador fiable de la existencia de riego así como de la cantidad de agua utilizada.

La información de campo ha sido dividida en dos conjuntos, uno incluyendo entre el 60 y 70% del total de datos disponibles para cada zona, y que ha sido empleado para el ajuste



del modelo, y un segundo conjunto de datos, que se ha reservado para el posterior proceso de validación de los resultados obtenidos.

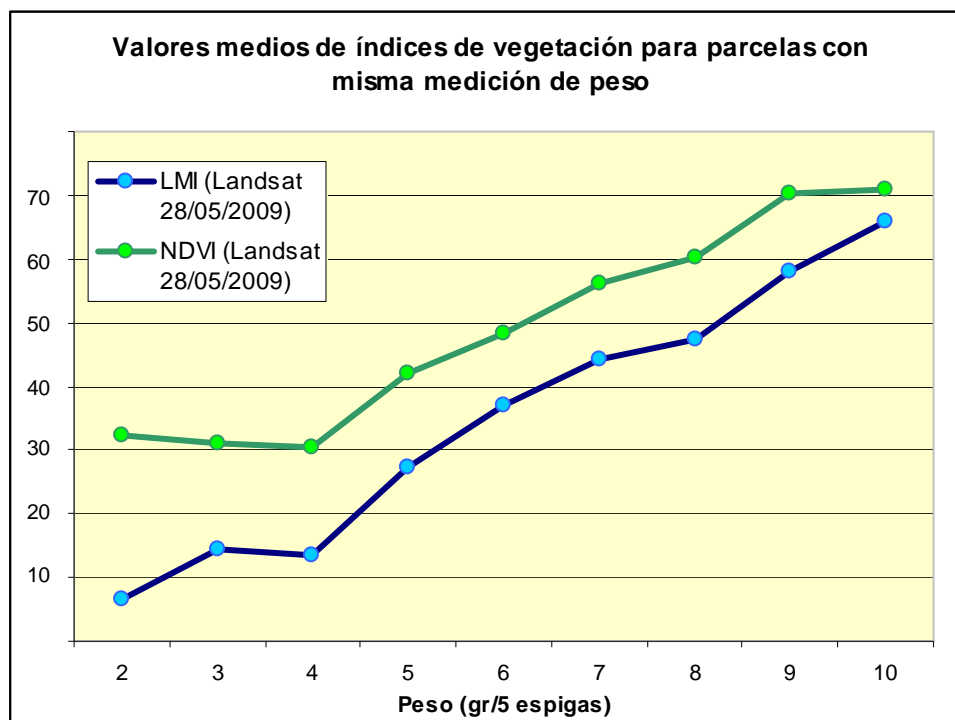


Figura 41. Comparación entre peso de espigas de cebada y valores de índices de teledetección

Dentro de cada una de las zonas de la segmentación, la información recopilada en campo se ha utilizado para establecer las diferencias entre las parcelas de riego y seco, en cuanto a los valores de los índices.

En cada zona, y para cada uno de los índices, se han definido umbrales para cada conjunto de parcelas asignadas al mismo *grupo según el historial de riego*. Todas aquellas parcelas con valores superiores al valor umbral, se asignan a la categoría de “cereal en regadío”.

Como criterio general, se han elegido valores que consigan maximizar el cumplimiento de las siguientes condiciones:

- inclusión de la muestra perteneciente a la clase de “*riego*”.
- exclusión de la muestra perteneciente a las clases de seco.
- inclusión de aquellas parcelas de las clases de “*posible riego de apoyo con infraestructura*” con una respuesta que pueda deberse a la presencia de riego.

La condición prioritaria para la definición de los umbrales ha sido la de minimizar la inclusión de muestra correspondiente a parcelas no regadas. Como factor de compensación, se ha impuesto que basta con que se cumpla al menos una de las condiciones establecidas (valores por encima del mínimo en alguno de los índices de alguna de las fechas), para que una parcela se discrimine como regada.



Los valores umbral son menores para las parcelas pertenecientes a los grupos asociados a una mayor probabilidad teórica de riego, aumentando progresivamente en los grupos que implican una menor probabilidad. Este hecho implica que parcelas asociadas a una rotación de riego intensivo sean incluidas en el mapa de cereal en regadío mientras que parcelas en rotación de secano con valores similares en los índices no se consideren regadas.

Por último, se han calculado mapas en modo ráster a partir de los umbrales más limitantes definidos para cada zona, y que representan las zonas que tienen una elevada probabilidad de ser regadíos. En este mapa, la discriminación del riego se adopta para cada píxel de la imagen, lo que permite delimitar áreas que no habían sido incluidas al trabajar en el ámbito de parcela. Estas áreas recogen zonas en regadío que comparten la misma parcela catastral con zonas en secano. Un ejemplo típico se produce en pívots de riego donde las zonas de esquina se encuentran cultivadas de cereal que no recibe agua. La media de los índices para el conjunto de la parcela queda reducida por la presencia del cereal de secano y puede ser inferior al valor umbral establecido para considerar la parcela como riego. El mapa ráster permite localizar este tipo de zonas y cartografiarlas para su inclusión en el mapa de cereal en regadío.

Para el caso del acuífero del Campo de Montiel el proceso ha sido más sencillo, ya que no se ha introducido el concepto de rotación de cultivos, ni se ha segmentado la zona, aunque se ha considerado la existencia de pívots como un factor de aumento de probabilidad de la existencia de riego.

Como resultado del proceso, se ha obtenido un mapa de cereal en regadío dentro de los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana (ver Figura 42).

Las parcelas de cereal en regadío se han dividido en tres grupos diferentes (ver Figura 43) según la intensidad apreciada en el riego:

- Riego con carácter intensivo.
- Riego de tipo genérico
- Riego de apoyo

El “*riego intensivo*” se ha caracterizado por la existencia de una mayor respuesta en las imágenes de final de mayo o principio de junio, ya que uno de los principales efectos del riego se traduce en un alargamiento del ciclo fenológico del cultivo, lo que permite una mejora en su rendimiento. El cereal en regadío tarda más tiempo en secar, lo que produce que en las imágenes disponibles correspondientes al final del ciclo del cultivo, se observen parcelas con una elevada actividad de fotosíntesis y presencia de humedad en la vegetación, mientras que otros cultivos de cereal se encuentran a punto de ser cosechados.

El “*riego de apoyo*” recoge aquellas parcelas que no se habrían considerado como regadas en caso de no haber sido caracterizadas como incluidas dentro de algún tipo de

sistema de rotación de cultivos o de no haberse considerado el aumento de posibilidad de existencia de riego dado por el análisis del histórico de imágenes. Las restantes parcelas se han considerado como regadíos con dotaciones estándar.

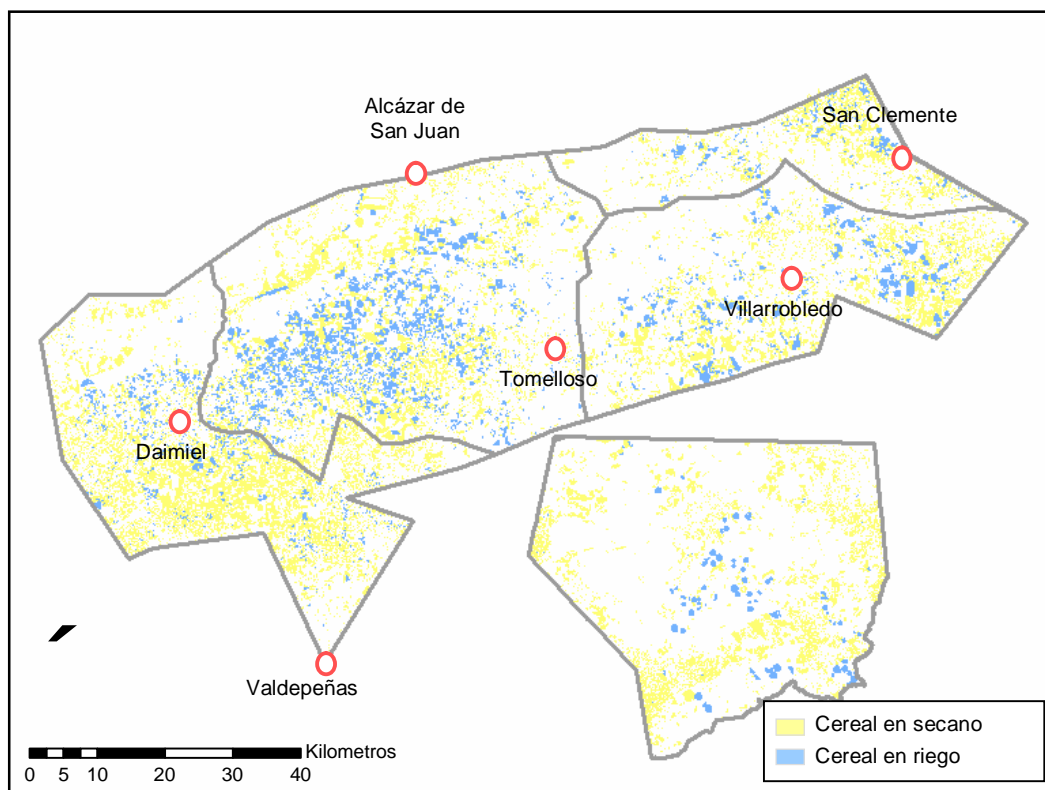


Figura 42. Mapa de distribución de cereal en secano y regadío en 2009



Figura 43 Ejemplo gráfico del mapa de cereal en regadío (escala 1:5.000).

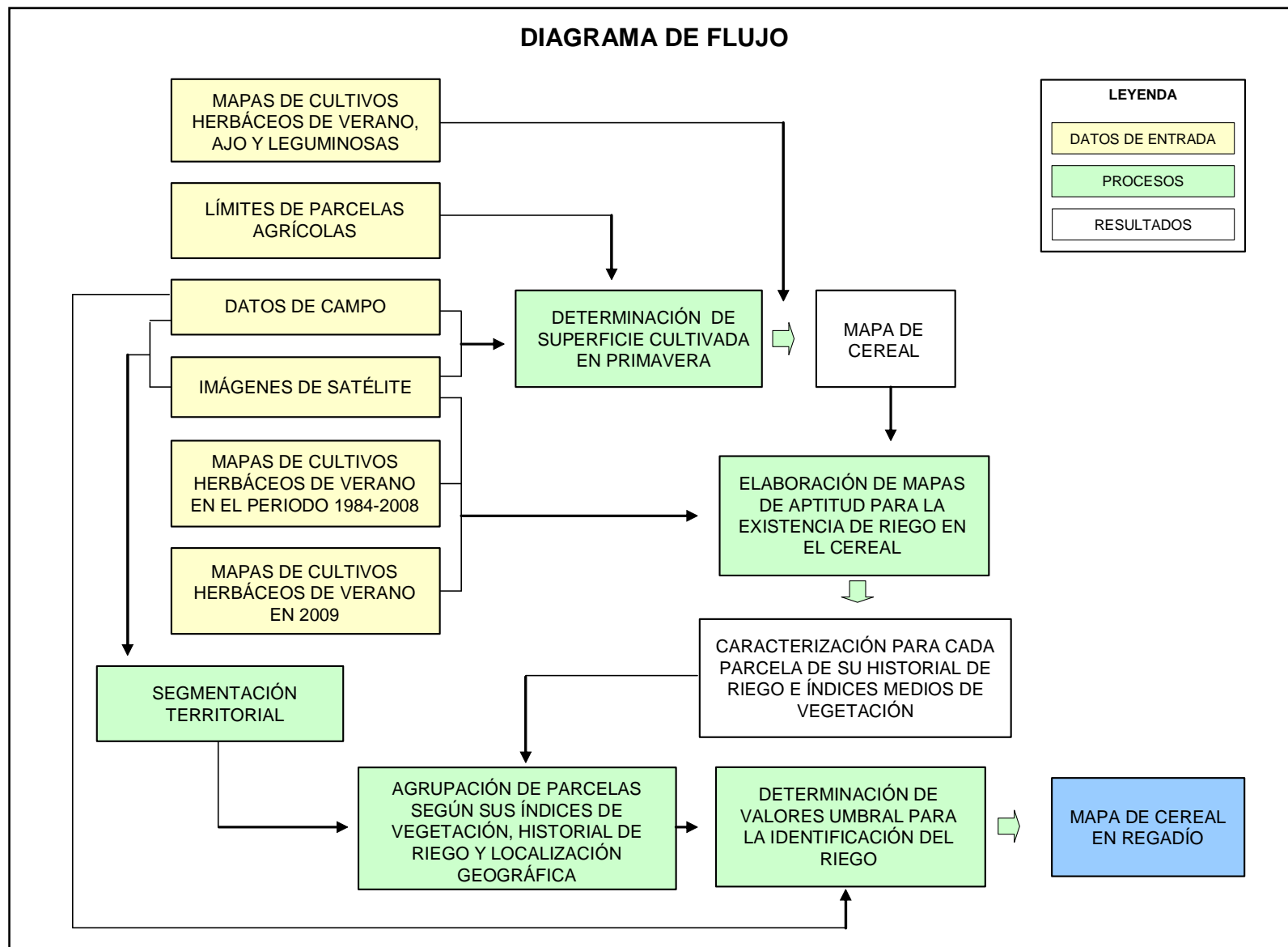


Figura 44. Diagrama de flujo del proceso metodológico para la identificación de cultivos herbáceos regados durante la primavera.

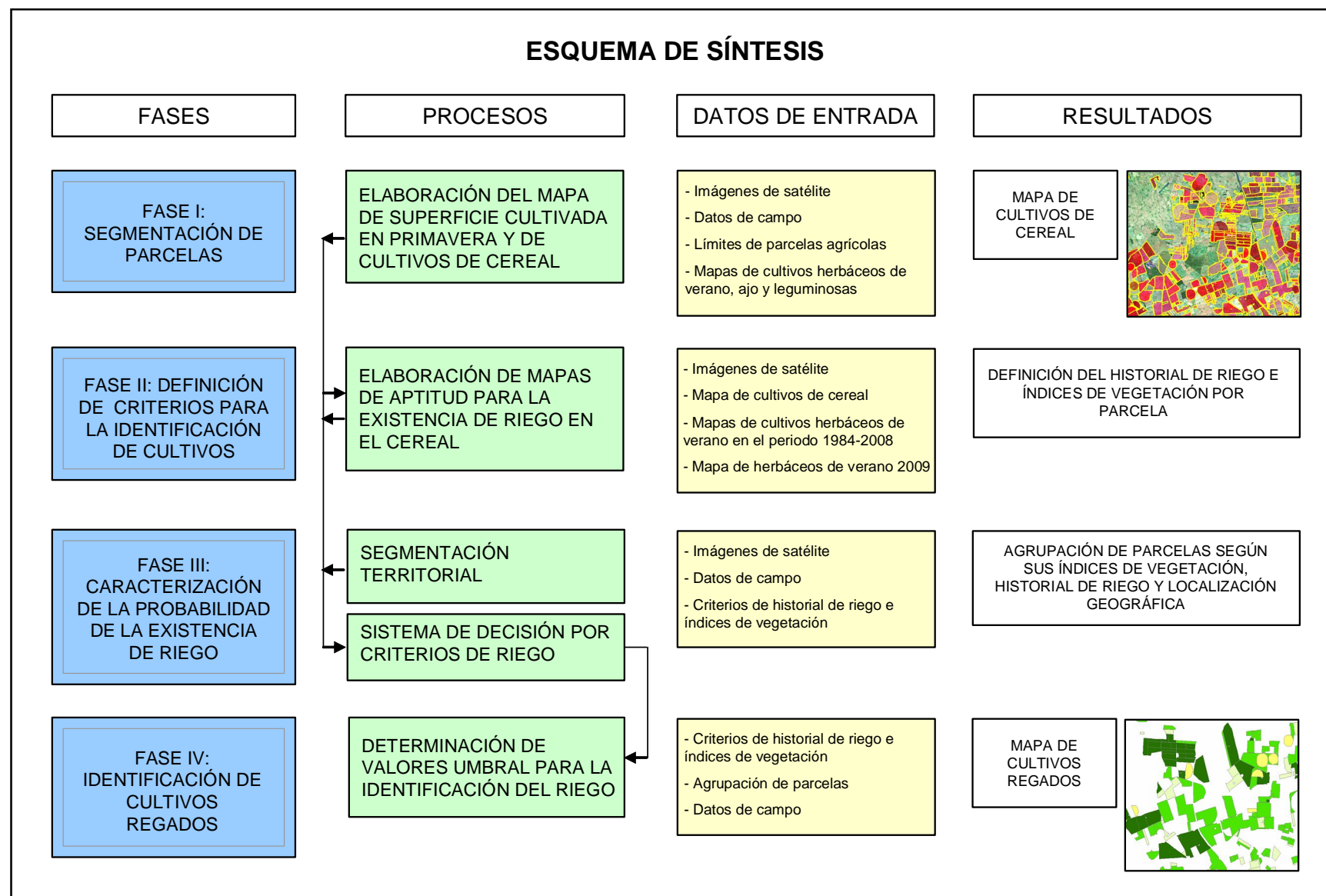


Figura 45. Esquema de síntesis del proceso metodológico para la identificación de cultivos herbáceos regados durante la primavera.

### 4.3. Distribución del viñedo en regadío

La viña se ha convertido, en los últimos años, en el cultivo en regadío con mayor extensión dentro de la Llanura Manchega, lo que ha motivado que, a pesar de tratarse de un cultivo con dotaciones bajas sea, en la actualidad, el principal consumidor de recursos hídricos.

Desde los años 80, en que el riego en el cultivo de la viña no estaba permitido, hasta hoy en día, el viñedo ha pasado de ser un cultivo típico de secano a un cultivo mayoritariamente regado dentro del ámbito de los acuíferos sobreexplotados, principalmente en las zonas centrales del acuífero de La Mancha Occidental (ver apéndice A.2.2.1). En este proceso, los Planes de reestructuración del viñedo promovidos por la Junta de Comunidades de Castilla La Mancha (JCCM) han tenido un papel fundamental, impulsando cambios en la cultura agronómica ligada a la viña. Muchas de las nuevas explotaciones de viña han sido plantadas con sistemas de espaldera y/o usando variedades de uva poco adaptadas a las condiciones climáticas semiáridas de la meseta Manchega pero de amplia aceptación para la elaboración de vinos de alto rango.

Estas prácticas favorecen la mecanización de las labores agrícolas así como la elaboración de vinos con un mayor potencial de comercialización en los mercados internacionales. No obstante, tanto el empleo de conducciones en espaldera como la plantación de variedades típicas de condiciones climáticas más húmedas (típicas de las regiones vitivinícolas de la Meseta Norte o Sur de Francia), imponen forzosamente la aplicación de riego para la supervivencia y correcto desarrollo del cultivo. En el caso de las espalderas, además del propio incremento del potencial osmótico que deben aplicar las plantas, el aumento de superficie foliar expuesta aumenta considerablemente su evapotranspiración. Por otro lado, las variedades no autóctonas presentan mayores requerimientos hídricos, al mismo tiempo que no cuentan con los mecanismos de adaptación a las severas condiciones de estiaje que han desarrollado las variedades tradicionales.

Además, el aumento de la producción (medida en kg uva/ha), ligado al uso del agua, ha motivado que otros muchos agricultores hayan decidido instalar captaciones y sistemas para la puesta en riego de sus viñedos.

La metodología empleada para la estimación de los cultivos herbáceos en regadío, no es válida para la determinación y localización de parcelas cultivadas de viña en regadío. Esto se debe a que factores tales como el desarrollo foliar de la vegetación y la humedad presente en las estructuras de la planta no permiten discriminar, con la precisión suficiente, la existencia de riego en la viña mediante el uso exclusivo de imágenes de satélite de alta resolución. Este hecho deriva de la existencia de una respuesta mezclada de vegetación y suelo en los datos captados por el satélite, de la diversidad de prácticas de cultivo y de las propias características fisonómicas de la vid. Entre estos factores, la

escasa cubierta vegetal del cultivo se convierte en el mayor inconveniente para la determinación de sus propiedades a partir del uso de la teledetección (Rubio, 2001).

Por este motivo, se ha trabajado en el diseño, desarrollo y validación de una metodología operativa para la cuantificación de superficies y elaboración de mapas de viñedo en regadío, en la que se integran diferentes datos geográficos dentro de un proceso de análisis espacial basado en la aplicación de técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC).

Con carácter general, las metodologías expuestas en el presente estudio se centran en el viñedo. Los restantes cultivos leñosos en regadío, representados principalmente por el olivo, ocupan superficies poco representativas en relación al viñedo. Estos cultivos han sido incluidos en el mapa final cuando se ha observado su presencia durante las campañas de campo.

La metodología se ha desarrollado a partir de los datos de campo e imágenes de satélite recopiladas para los años 2008 y 2009, usando como apoyo un conjunto de datos administrativos y de mapas relacionados con cambios en el uso del suelo. El proceso seguido para el primer año ha resultado una primera aproximación que ha servido para definir y ajustar con mayor detalle los criterios, condiciones de contorno y parámetros a aplicar en años posteriores.

Como fase previa al desarrollo de la metodología, se han establecido las condiciones de aplicación:

- las zonas potencialmente ocupadas por viña en riego se han definido a partir de la elaboración de un mapa actualizado de distribución de las parcelas de viña (**segmentación de parcelas**).
- la uniformidad de las condiciones de aplicación se ha optimizado a partir de un proceso de **segmentación territorial**.

Sobre esta base, las parcelas de viña han sido asignadas a las categorías posibles de regadío/secano, para así obtener el mapa de viña regada.

#### **4.3.1. Elaboración del mapa de distribución del viñedo**

Para la estimación de la existencia de riego en el viñedo resulta necesario determinar previamente, con la máxima fiabilidad posible, la distribución de parcelas de viña. Con este objeto, se ha elaborado una cartografía de las parcelas cultivadas de viñedo dentro de la zona de estudio durante los años 2008 y 2009.

Los procesos seguidos para la preparación de la cartografía no han sido demasiado complejos, basándose en la identificación visual con el apoyo de mapas de análisis de cambios generados a partir del proceso digital de imágenes. Aunque existen líneas de investigación muy prometedoras para la realización semiautomática de inventarios de viñedo a partir de datos de Observación de la Tierra (Delenne et al, 2008), estos



procedimientos son laboriosos, y presentan una fiabilidad que se reduce considerablemente según aumenta el área de trabajo. Por este motivo, sería necesario realizar una revisión completa sobre toda la zona de estudio después de la ejecución del proceso digital semiautomático. Dada la importancia de contar con una cartografía precisa, ésta ha sido elaborada siguiendo un proceso de edición manual, lo cual si bien requiere un mayor esfuerzo y tiempo de trabajo, también asegura una mayor calidad en los resultados obtenidos. Sobre la base proporcionada por esta cartografía, es conveniente realizar actualizaciones periódicas siempre que se disponga de los datos necesarios, en cuyo caso, las técnicas de proceso automático se erigen como una alternativa interesante.

La base cartográfica se ha obtenido mediante fotointerpretación, a partir de la integración gráfica de las parcelas catastrales sobre ortofotografía digital en color adquirida el verano de 2006. En este proceso, se han identificado las parcelas cultivadas de viña junto con su sistema de conducción.

Para ello, en el marco de un SIG, se ha realizado un barrido secuencial con una escala fija de visualización y se han etiquetado las parcelas ocupadas por viñedo, distinguiendo si la ocupación es total o parcial, si la viña es el único cultivo o aparece asociada con otros leñosos, y si el sistema de plantación ha sido en vaso o en espaldera. Estos datos han sido asociados con la cartografía de parcelas catastrales, realizándose un proceso de control de calidad y un proceso de edición antes de conseguir el mapa final de distribución de viña en el año 2006.

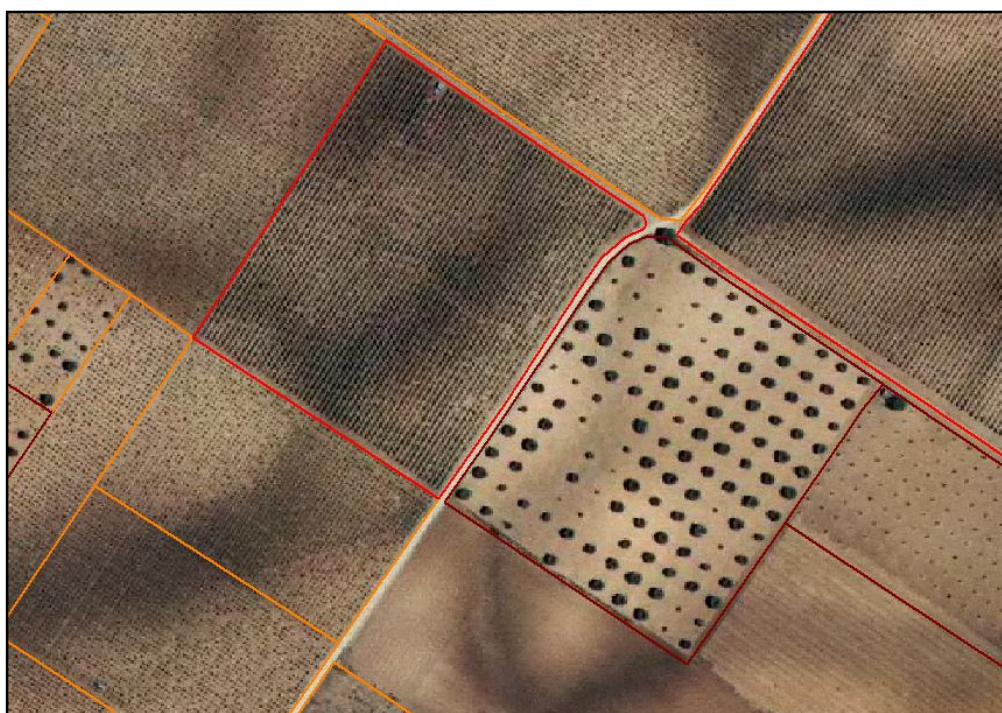


Figura 46. Identificación de cultivos leñosos sobre ortofoto digital. En color naranja se delimitan las parcelas de viñedo en vaso, en color rojo, la viña en espaldera, y en color marrón los cultivos de porte arbóreo.

Para la obtención de los mapas de distribución de viñedo para los años 2008 y 2009, ha sido necesario realizar un proceso de actualización utilizando la información proporcionada por las imágenes de satélite. La resolución de este conjunto de imágenes no permite una discriminación fiable de los cultivos leñosos de forma directa. Así, el enfoque elegido ha sido el de análisis de cambios, teniendo en cuenta el carácter permanente de los cultivos leñosos. Los cambios en la distribución del viñedo no han sido significativos, de forma que la base cartográfica elaborada para el año 2006 se mantiene en su mayor parte para los años 2008 y 2009.

La existencia de arranques en el viñedo, se ha localizado mediante dos aproximaciones diferentes, derivadas de los condicionantes propios del proceso de arranque de la viña. El arranque de viñedo ha contado, durante el año 2009, con una subvención por parte de la Consejería de Agricultura de la JCCM. Tras la aprobación de la ayuda, el agricultor debe proceder al arranque de las cepas y esperar a su certificación en campo por técnicos de la Administración regional. Después del arranque, las parcelas quedan en barbecho hasta que se produce la certificación necesaria para el cobro de las ayudas, momento tras el cual pueden volver a ser cultivadas. Durante las campañas de campo se ha observado que el cultivo de cereal suele ser el más habitual en estos casos, seguramente con la intención de recuperar el terreno tras años continuados de cultivo de la viña.

Así, en primer lugar, se han buscado parcelas catalogadas como viñedos en 2006 y que posteriormente se observen como cultivadas de cereal. Para ello, se ha cruzado una cartografía de cultivos de primavera en 2008 y 2009 con el mapa de viña obtenido tras el proceso de fotointerpretación, localizando zonas donde ya no se produce el cultivo de viñedo en los años de interés. Debido a que el ciclo de desarrollo fenológico de cereal y vid se produce en estaciones diferentes, la determinación de la existencia de un cultivo durante la primavera resulta un método seguro para la certificación del arranque del viñedo.



Figura 47 Parcelas de viñedo arrancadas en 2009 (en color azul) y localizadas por haber sido cultivadas con herbáceos durante la primavera de 2009, tal y como se aprecia en la imagen de mayo de 2009. En color naranja, aparecen las parcelas de viñedo.



Por otro lado, se han identificado zonas ocupadas por viñedo donde en las imágenes de verano de 2008 y 2009 no se observe ninguna presencia de vegetación y donde aparentemente prevalezca la presencia de suelo desnudo. Para facilitar la localización de estas parcelas se ha efectuado un proceso de análisis de cambio en la respuesta espectral de pares de imágenes de satélite adquiridas en años diferentes aunque en fecha similar. Este proceso se ha basado en la resta de valores de índice de vegetación calculados para cada fecha. Las parcelas donde se hayan producido arranques deben cumplir dos condiciones:

- presentar una reducción evidente en la respuesta del índice de vegetación calculado a partir de imágenes de verano de fechas sucesivas y
- presentar valores bajos en el índice de vegetación asimilables a la existencia de suelos desnudos o parcelas en barbecho.

Para la actualización correspondiente al año 2008, se han procesado las coberturas SPOT disponibles para los años 2005 y 2008, mientras que para el año 2009, el análisis de cambios se ha llevado a cabo a partir de imágenes Landsat adquiridas en el mes de agosto de 2005 y 2009.



Figura 48. Detección de arranques de viñedo. En color naranja se representan parcelas identificadas como viñedo en 2008 y 2009. En color azul claro, se muestran parcelas que han sido arrancadas.

Como último paso dentro de la actualización, se han localizado parcelas con respuesta espectral característica del viñedo y no contempladas en el mapa de 2006, con la finalidad de incluir parcelas de viña que hayan entrado en producción y tengan una respuesta apreciable en las imágenes de satélite. Estas parcelas han sido cartografiadas manteniendo la base catastral e incorporadas en los mapas de viñedo de los años 2008 y 2009. El proceso seguido para la identificación de estas parcelas ha sido análogo (aunque opuesto) al definido para la localización de arranques. Como apoyo a este proceso se ha empleado el mapa de cultivos herbáceos regados durante el verano con objeto de no considerar estas parcelas como posibles viñedos.

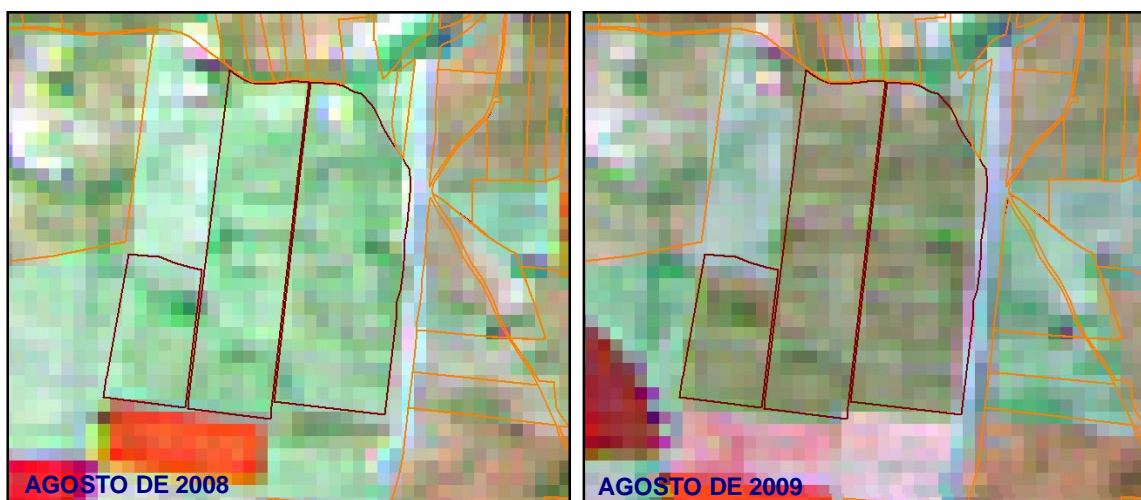


Figura 49. Inclusión de parcelas en el mapa de 2009 en base a su respuesta en las imágenes de verano.

El conjunto de estos trabajos ha permitido determinar y cuantificar el viñedo presente, a partir de mapas actualizados del viñedo dentro de los acuíferos sobreexplotados para los años 2008 y 2009 (ver Tabla 25 y Figura 50).

Tabla 25. Superficie de viñedo en 2009.

Perímetro	Superficie cultivada de viña (ha)	
	2008	2009
U.H. de La Mancha Occidental	159.868	154.623
Zona Regable de Peñarroya	2.391	2.428
P.S. del Campo de Montiel	2.624	2.607
<b>TOTAL</b>	<b>164.883</b>	<b>159.658</b>

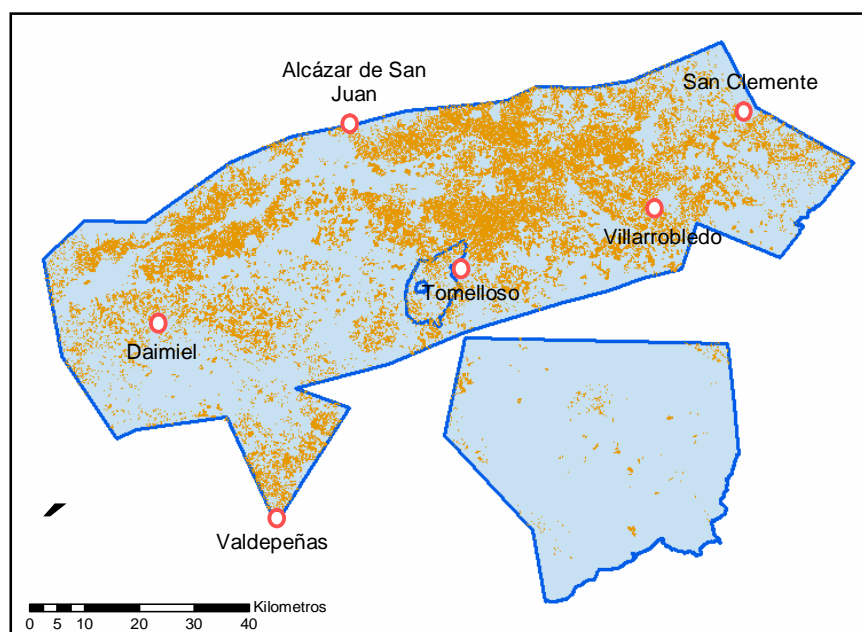


Figura 50. Distribución del viñedo dentro de los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana.

#### 4.3.2. Segmentación territorial del viñedo

Debido a la variabilidad observada durante la campaña de campo en relación a las prácticas agrícolas, tipos de terreno, abundancia relativa del cultivo e intensificación agraria de los viñedos dentro del ámbito de estudio, se ha llevado a cabo una segmentación territorial con objeto de aplicar el desarrollo metodológico por separado en zonas donde las características del viñedo presenten una mayor homogeneidad. De esta manera, es posible realizar ajustes más precisos en la definición de los parámetros y valores umbrales para la discriminación de la presencia o ausencia de riego.

Esta forma de trabajo contribuye a minimizar el error que podría derivarse de la falta de representatividad de la muestra, de una elevada variabilidad en las características de la viña, o de la existencia de algún error en los datos de partida.

El proceso se ha llevado a cabo en dos fases. A partir de los datos tomados en el año 2008, se obtuvo una primera zonificación (ver apartado 3.2.1.iii), donde además de un conjunto de datos de apoyo, se tuvieron especialmente en cuenta los datos obtenidos a lo largo de la campaña de campo, que fue diseñada con objeto de determinar la existencia de patrones espaciales relacionados con la densidad del riego en la viña.

El diseño de la campaña de campo de 2009 se ciñó a esta segmentación, aunque para la fase de determinación de riego se han incorporado leves modificaciones, basadas en observaciones realizadas durante la propia campaña de campo. La segmentación final utilizada se recoge en la Figura 51.

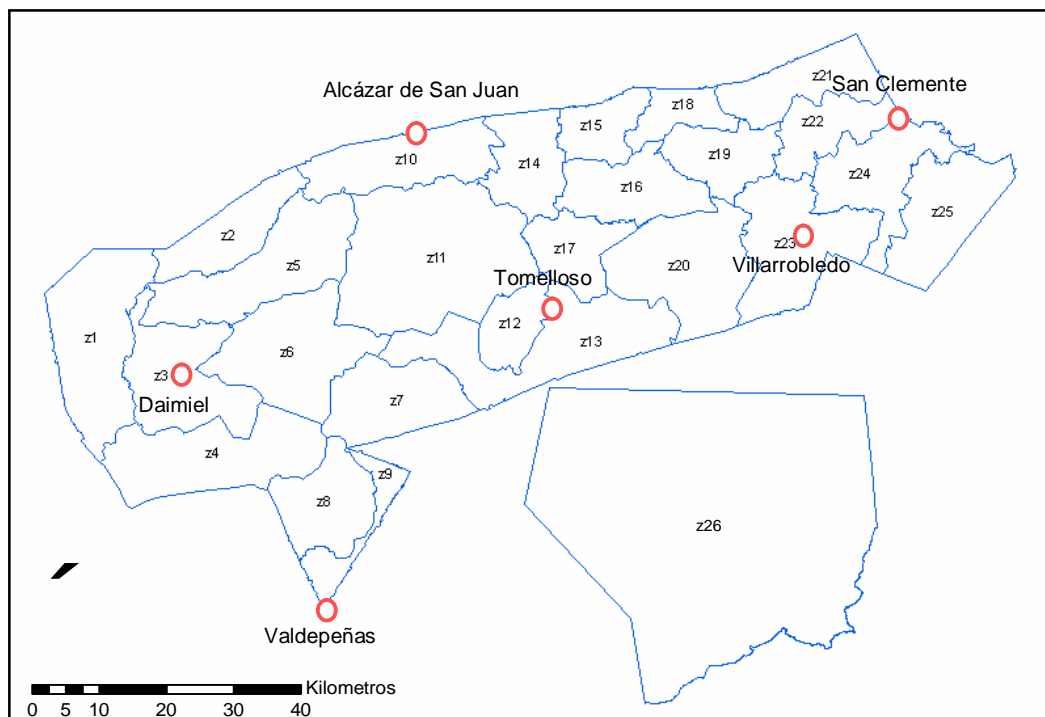


Figura 51. Zonificación para la estimación del viñedo en regadío en 2009.

La superficie de estudio se ha dividido en 26 zonas, realizándose el análisis espacial por separado para cada una de ellas, para posteriormente unir los resultados.

La principal diferencia entre las zonas radica en el porcentaje de riego observado en campo, que varía notablemente a lo largo de la zona de estudio (ver Tabla 26). Mediante la reducción del efecto de esta variable, se trata de conseguir un mejor ajuste en la aplicación de la metodología propuesta.

Tabla 26. Zonificación para la estimación de la viña en regadío.

<b>ZONA</b>	<b>Nombre</b>	<b>Porcentaje de riego de viña observado en campo</b>	<b>Porcentaje de viña muestreado</b>
Zona 01	Torralba – Carrión – Fuente Fresno	66,7%	20,4%
Zona 02	Villarrubia N - Puerto Lapice	58,0%	13,2%
Zona 03	Daimiel	88,8%	27,2%
Zona 04	Almagro – Bolaños	85,1%	32,1%
Zona 05	Villarrubia S – Arenas – Villarta	80,7%	18,9%
Zona 06	Daimiel E - Manzanares O	81,5%	23,4%
Zona 07	Manzanares O	16,3%	20,1%
Zona 08	Valdepeñas N – Membrilla	64,6%	24,8%
Zona 09	Valdepeñas S - La Solana	46,3%	14,0%
Zona 10	Herencia N - Alcázar N	48,6%	8,8%
Zona 11	Alcázar - Campo Criptana S	95,3%	30,2%
Zona 12	Z.R. Argamasilla	96,8%	30,0%
Zona 13	Tomelloso S - Socuéllamos S	64,4%	30,9%
Zona 14	Campo Criptana N	69,5%	24,9%
Zona 15	Pedro Muñoz N	54,6%	17,0%
Zona 16	Tomelloso N - Socuéllamos N	83,8%	17,3%
Zona 17	Tomelloso - Socuéllamos O	78,1%	23,2%
Zona 18	Mota - Mesas N	78,3%	39,5%
Zona 19	Mesas – Pedroñeras S	74,0%	24,7%
Zona 20	Socuéllamos - Villarrobledo O	82,9%	20,2%
Zona 21	Pedroñeras N - Alberca	51,8%	20,9%
Zona 22	Provencio - San Clemente N	41,9%	12,7%
Zona 23	Villarrobledo	60,4%	24,3%
Zona 24	San Clemente	77,5%	17,3%
Zona 25	Casas - Villarrobledo E	48,6%	18,8%
Zona 26	Campo de Montiel	24,2%	11,2%
<b>TOTAL</b>		<b>70,2%</b>	<b>22,0%</b>

En la zona del Campo de Montiel, la viña es un cultivo poco representativo, y su riego se restringe casi de forma exclusiva a explotaciones en espaldera situadas en la parte central. Por este motivo, la metodología aplicada en la zona ha sido simplificada, identificando como riegos las explotaciones en espaldera y aquellas plantaciones en vaso con valores de índice de vegetación muy superiores a los de las parcelas de viña cercanas. Así, el desarrollo metodológico que se describe en el siguiente apartado se ha diseñado y aplicado solamente en el acuífero de La Mancha Occidental.

#### **4.3.3. Discriminación de la existencia de viñedos regados**

La determinación de la presencia / ausencia de riego se realiza para cada parcela ocupada por viñedo, tomando como base los mapas de distribución de viña actualizados a los años 2008 y 2009.

La metodología empleada para la discriminación de la existencia de riego en cada parcela se basa en la integración, a partir de técnicas de **evaluación multicriterio**, de diferentes datos geográficos que guardan relación con la posibilidad de que una explotación de viña se encuentre en regadío.

El desarrollo metodológico se ha llevado a cabo a través de varias fases consecutivas, que se describen y desarrollan dentro del presente apartado.

El proceso comienza con la **definición de criterios** (en forma de mapas) que representan condiciones o mediciones relacionadas con la posible presencia de riego en cada parcela (fase 1). Estos criterios abarcan desde índices de vegetación elaborados con imágenes del año y relacionados con la cantidad de cubierta foliar del viñedo, hasta datos administrativos y análisis de la secuencia histórica de riego y usos del suelo en cada parcela. Los criterios seleccionados contienen, en todos los casos, información útil relacionada con la presencia / ausencia de riego en las viñas, aunque **deben ser cuantificados** numéricamente y normalizados entre sí (fase 2).

La **combinación de los criterios** a partir de un algoritmo o regla de decisión (fase 3) permite obtener un mapa de probabilidad de riego. Las **condiciones para la aplicación** de la regla de decisión han sido identificadas a partir de ensayos de validación (fase 4) con objeto de que los mapas de probabilidad multicriterio sean fieles a la distribución del viñedo en riego. Finalmente, se ha utilizado la muestra recogida en campo para definir umbrales de **separación entre parcelas** de viña **en secano y en regadío** (fase 5).

El proceso se realiza por separado para cada una de las zonas derivadas del proceso de segmentación territorial. Además, los criterios y ajustes de valores así como los métodos de ponderación y de establecimiento de umbrales de asignación han sido definidos de acuerdo a los resultados obtenidos en varios ensayos.

#### 4.3.2.1. Definición de criterios

La aproximación metodológica mediante Evaluación MultiCriterio (EMC), se basa en el análisis de las características del territorio para la determinación de las *restricciones* lógicas y los *factores* que favorecen o no la existencia de viñedo en regadío.

Mediante un proceso de modelado, basado en la integración de ambos tipos de criterios (*factores de aptitud* y *restricciones*), se generan mapas de acogida, que representan la probabilidad observada en las diferentes zonas del territorio de contener un determinado uso del suelo, en este caso el de viñedo en regadío.

Las *restricciones* limitan, en forma de mapas, las zonas del territorio donde no puede situarse un uso del suelo determinado, bien por imposibilidad física, bien por estar anteriormente ocupado por otro uso del suelo desde el cual no puede llegar a evolucionar. En nuestro caso, se han utilizado las zonas no ocupadas por viñedo como mapa de restricción. De esta manera, la cartografía de parcelas de viñedo delimita, para cada año, las zonas del territorio donde pueden aparecer viñedos en regadío.

Los *factores* de aptitud para una categoría de usos del suelo se presentan en forma de mapas en los que se cuantifica la predisposición del terreno para la localización del uso considerado, en función de alguna de sus características o de los usos del suelo previamente existentes.

El proceso de evaluación multicriterio se centra en decidir sobre tres aspectos fundamentales:

- ¿Cuáles son las variables de tipo geográfico y territorial que inciden de manera significativa en la probabilidad de existencia de riego en una parcela de viña?
- ¿Qué valores cuantitativos deben ser asignados a cada una de las situaciones cualitativas que miden los mapas de aptitud?
- ¿Cuál es el grado de incidencia de cada una de las variables considerada y cómo medir y ponderar las diferencias en este grado de incidencia?

En este apartado se aborda la primera de las cuestiones, mientras que las otras dos son tratadas posteriormente.

La selección de las variables, resulta un punto crítico para la obtención de resultados fiables en el proceso de modelización.

Los mapas de aptitud del territorio han sido elaborados basándose tanto en las características del viñedo, como en datos auxiliares de referencia relacionados con la posible existencia de riego. Estos mapas se han calculado de forma que cada parcela de viña tenga un único valor medio en cada uno de los mapas, habiéndose definido:

- Mapas de índice de vegetación. Los valores asignados representan el valor medio de índice de vegetación para cada parcela de viñedo.



El índice de vegetación presenta una correlación elevada con la fracción de cubierta vegetal. Este parámetro aumenta considerablemente con la presencia del riego, ya que la planta presenta un mayor desarrollo foliar y además aumenta la cantidad de hojas expuestas al tener menores problemas de refrigeración.

En las imágenes de finales de agosto, estas diferencias son máximas entre parcelas de secano y regadas, aunque otros factores como la variedad, edad, tipo de terreno y marco de plantación son también fuente de variabilidad y pueden producir confusión en la determinación del riego. Para intentar limitar la influencia de estos factores se ha considerado la presencia de otros factores de aptitud dentro de la metodología.

Los mapas de índice de vegetación han sido calculados de forma directa a partir de imágenes del satélite SPOT de verano de 2008 y del satélite Landsat adquiridas durante la segunda quincena de agosto de 2009.

Además, para el año 2009 se ha calculado la diferencia en el valor de índice de vegetación entre imágenes Landsat de agosto y marzo, para eliminar el ruido presente en el índice que procede de la propia respuesta del suelo desnudo. Este procedimiento no deja de ser una aproximación, ya que la respuesta del suelo no es constante y se ve alterada tanto por la presencia de malas hierbas como por variaciones en su humedad superficial.

- Mapa de cambios de uso del suelo en relación al año 1987, para el que se dispone de una cobertura gráfica de la viña existente entonces. La tipología de las transformaciones sufridas por las parcelas y la detección de riegos de herbáceos en algún verano previo suponen un condicionante claro de presencia de riego en la actualidad. Cada parcela ha sido clasificada en varios grupos dependiendo de si continúa siendo un viñedo en la actualidad, o si ha sido transformado en viña desde una parcela sin riego u ocupada parcial o totalmente por un cultivo herbáceo regado en algún verano dentro del periodo 1984-2008.
- Mapa de viñas asociadas a elementos de riego. En esta capa se han integrado un conjunto de datos auxiliares relacionados con evidencias de presencia de riego: i) parcelas de viñedo asociadas a alguna concesión para el uso de aguas subterráneas según el sistema Alberca; ii) parcelas con un pozo en su interior de acuerdo al Inventario de captaciones realizado entre 1999 y 2002; iii) parcelas donde se observó la existencia de riego en campo en los años 2005-2008; iv) y un conjunto de parcelas en las que se apreció la existencia de infraestructura de riego en el año 2001 a partir de la fotointerpretación de imágenes aéreas.

En este conjunto de criterios se integran los datos de partida que van a ser usados para la discriminación de la presencia de riego en el viñedo. Los factores de aptitud considerados aúnan datos de teledetección (de la campaña en curso y de años previos), datos de carácter administrativo, y observaciones de campo y fotointerpretación.

#### 4.3.2.2. *Asignación de los valores de los criterios.*

Los mapas de aptitud (criterios) utilizados pueden corresponderse tanto a variables ordinales como a variables nominales, siendo las únicas limitaciones impuestas, la existencia de: una potencial relación con la puesta en regadío de la viña y de un componente geográfico que permita su representación espacial sobre el territorio.

En el caso en que la escala de medida asociada a un criterio sea de tipo cualitativo, ésta debe ser transformada a valores numéricos de forma que se posibilite su integración matemática con otros criterios y datos auxiliares. Cada una de las categorías incluida en un criterio cualitativo debe ser asociada a un valor numérico.

Por lo general, este paso conlleva un grado considerable de subjetividad, ya que en muchas ocasiones debe basarse en juicios de valor por parte de operadores y técnicos (Gómez y Barredo, 2005). Los aspectos que suelen considerarse comprenden: trabajos previos relacionados, clasificaciones realizadas para otros criterios, entrevistas con expertos, o cualquier otra fuente que ayude a proporcionar algún tipo de información sólida y justificada. Se suele admitir la falta de acuerdo acerca de la existencia de una solución óptima a este problema, no existiendo un procedimiento que sea aplicable a cada estudio del territorio (Voogd, 1983).

Entre los procedimientos propuestos encontramos el método de valoración completa, basado en el establecimiento de una secuencia ordinal de preferencia, y el método de comparación por pares (Saaty, 1980), también basado en juicios de valor empleados para ordenar las categorías en función de la relación comparada entre parejas, en una escala que oscila entre  $1/n$  y  $n$ , representando esta variable la capacidad de discriminación dentro del proceso de comparación.

Dentro del presente estudio, se han considerado dos criterios (*mapa de cambios de uso y mapa de viña asociada a elementos de riego*) cuyos valores son de tipo cualitativo. En ambos casos, se ha desarrollado un proceso de asignación en dos fases, desarrolladas de forma consecutiva durante los años 2008 y 2009.

- i) En el primero de los años en que se ha trabajado (2008), la asignación se ha centrado en la aplicación de métodos de tipo subjetivo. Los juicios de valor se han simplificado en la medida de lo posible, con objeto de que la incertidumbre asociada no afecte significativamente a los resultados.
- ii) El proceso de transformación utilizado para el año 2009, se han apoyado en la comparación entre los criterios subjetivos y los mapas de distribución y probabilidad de viña en riego obtenidos para el año 2008. Sobre esta base, se han cuantificado los parámetros que optimizan el proceso de transformación de variables cualitativas en numéricas. De esta forma, se ha intentado introducir mayor objetividad en el proceso y evitar la aparición de una fuente de error no controlado, ligada al carácter discutible de decisiones subjetivas.



i) En **2008**, la transformación de los valores de los dos criterios cualitativos ha supuesto una primera aproximación.

En relación al mapa de cambios de uso del suelo, las categorías asignadas a las diferentes parcelas de viñedo comprenden:

- Viñedos cultivados en 1987, y que han continuado hasta la actualidad. (“V87”)
- Viñedo cultivado en 1987, y donde en alguno de los veranos del periodo 1988 - 2004 se aprecia la existencia de riego de herbáceos o una cubierta vegetal muy elevada del viñedo. (“V87: H8804”)
- Viñedo no cultivado en 1987, y donde en ninguno de los veranos del periodo 1984 - 2004 se aprecia la existencia de riego de herbáceos o una cubierta vegetal muy elevada del viñedo. (“H87”)
- Viñedo no cultivado en 1987, y donde en alguno de los veranos del periodo 1984 - 2004 se aprecia la existencia parcial de riego de herbáceos o una cubierta vegetal muy elevada del viñedo. (“H87: H8404p”)
- Viñedo no cultivado en 1987, y donde en alguno de los veranos del periodo 1984 - 2004 se aprecia la existencia de riego de herbáceos o una cubierta vegetal muy elevada del viñedo sobre el conjunto de la parcela. (“H87: H8404”)

La selección de este criterio se basa en la atribución de una mayor probabilidad de existencia de riego en los viñedos que provengan de la transformación de un cultivo herbáceo. Muchas de las nuevas plantaciones han venido de la mano de los Planes de Reestructuración, lo que favorece el riego en la viña, ya que la inversión realizada ha contado con ayudas que potencian la selección de variedades alóctonas, la mayor mecanización en la gestión del cultivo y/o la búsqueda de un aumento de producción gracias al efecto del riego.

Dentro de los casos posibles, también se ha tenido en cuenta que la existencia de cultivos herbáceos regados durante alguno de los veranos desde el primer año de referencia (1984) implica que estas parcelas (que son viñedos en la actualidad) han contado con sistemas de riego en uso.

Dentro del periodo analizado se ha producido un cambio progresivo en los usos del suelo desde una agricultura donde predominaba el consumo de agua ligado al riego en verano de cultivos de alta dotación hacia la situación actual, en la que el viñedo regado es el mayor consumidor de recursos hídricos subterráneos (ver apéndice A.2.2.3). En este contexto cabe pensar que aquellas explotaciones regadas cuando se cultivaban de herbáceos posiblemente sigan en riego una vez transformadas a viñedo.

El cálculo de los mapas de superficie regada se ha realizado a partir del proceso digital de la serie de imágenes Landsat adquiridas dentro del periodo de referencia, siguiendo una metodología análoga a la expuesta en el apartado 4.1.2. En este caso, los umbrales

de discriminación del riego no han sido restrictivos con la idea de incluir la práctica totalidad de los herbáceos regados junto con algunas parcelas de viña con valores similares en los índices de vegetación empleados. Este tipo de viñedos tienen una elevada probabilidad de haber sido regados, debiendo presentar una cubierta vegetal alta en relación a los estándares del cultivo en la zona.

En base a este conjunto de factores, para el año 2008 se realizó una asignación de tipo subjetivo, en la que, de acuerdo al potencial incremento en la probabilidad de encontrarse en riego que presenta, a priori, cada una de las categorías definidas, éstas fueron ordenadas mediante un método ordinal comparativo (los resultados se muestran en la Tabla 27). Este orden relativo entre categorías ha servido para poder otorgar a cada una de ellas un valor numérico que trata de medir el potencial de encontrarse en riego de cada parcela de viñedo en función de los cambios de uso del suelo que haya sufrido en los últimos 25 años.

Tabla 27. Asignación inicial de valores numéricos a las variables del mapa de cambio de usos

	CATEGORIAS DEL MAPA DE CAMBIO DE USO				
	V87	V87: H8804	H87	H87: H8404p	H87: H8404
ORDEN	0	3	1	2	4
VALOR	0	75	25	50	100

Para el mapa de elementos relacionados con la presencia de riego en el viñedo, las categorías consideradas son:

- Viñedo cartografiado dentro del sistema Alberca asociado a las solicitudes de uso privativo de aguas subterráneas inscritas en el Catálogo de Aguas Privadas o en el Registro de Aguas. (*"Referencia\_Alberca"*)
- Viñedo asociado a algún pozo incluido en el Inventario de captaciones realizado por la Confederación Hidrográfica del Guadiana a través de trabajos extensivos de campo entre 1999 y 2002. (*"Referencia\_Pozo"*)
- Viñedo observado en regadío en alguna de las campañas de campo realizadas entre los años 2005 y 2008. (*"Referencia\_Campo"*)
- Viñedo en los que se apreció mediante la fotointerpretación de imágenes aéreas la existencia de infraestructura de riego en el año 2001. La presencia de riego se basa en la observación de espalderas o de las líneas de humedad y vegetación asociada a las filas de goteros y a las tuberías de aspersión (*"Referencia\_FI"*).

En este caso, las categorías resultan complementarias entre sí, pudiendo existir, tanto parcelas que no cumplan los requisitos de ninguna categoría, como parcelas que puedan ser incluidas en las cuatro, pasando por todos los casos intermedios.

Para todas las categorías, los factores considerados parecen tener una relación evidente con la probabilidad de existencia de riego, aunque también existen condicionantes que afectan a esta relación y que se deben tener en cuenta:

- Las parcelas incluidas en la categoría de “*referencia Alberca*”, deberían conformar la cartografía de explotaciones de viña legalizadas, es decir el conjunto de parcelas de viñedo con derecho para el riego a partir de aguas subterráneas. Sin embargo, esta cartografía presenta problemas de fiabilidad, derivados, en su mayor parte, de las limitaciones tecnológicas existentes en el momento en que se llevó a cabo la tramitación de los expedientes de inscripción y de la falta de peso que se otorgó al componente cartográfico dentro del propio proceso de resolución de los expedientes (ver Apéndice A.3.3.2). La inclusión de una parcela en esta cartografía puede ser un factor evidente de la presencia de riego aunque al mismo tiempo, resulta posible que una parcela cartografiada no tenga ningún tipo de relación con ningún expediente de uso de aguas subterráneas o que se asocie con una parcela con derechos que no se vienen ejercitando. Por ello, la pertenencia a esta categoría debe considerarse un factor de aumento de probabilidad, pero no una condición suficiente para la presencia de riego.
- Un razonamiento similar se puede aplicar a la categoría de “*referencia pozo*”. La existencia de un pozo en el interior de una parcela es un factor que aumenta la probabilidad de que se riegue. No obstante, en el inventario no se comprobó el grado de mantenimiento y uso de las captaciones, por lo que existen puntos inventariados que no corresponden a pozos en funcionamiento.
- La categoría de “*referencia campo*” resulta posiblemente la de mayor fiabilidad, ya que recoge viñedos observados en riego en los últimos años. Sin embargo, su principal limitación radica en que los muestreos realizados sólo recogen una parte del total del viñedo existente, por lo que esta categoría aporta una información sesgada. No obstante, la inclusión en esta categoría supone un incremento en la probabilidad de existencia de riego.
- Por último, la categoría de “*referencia FI*”, aporta un dato de gran valor, ya que recoge parcelas de viñedo donde se han apreciado indicios claros de la existencia de riego. En este caso, hay que considerar que la fuente de datos usada se remonta al año 2001, así como la dificultad propia del proceso de fotointerpretación, más si ha sido realizado sobre ortofotografía en blanco y negro.

En 2008, la transformación de los valores debe basarse en juicios de carácter subjetivo. Dado que no existe competencia entre las categorías (la pertenencia de una parcela a una categoría dada no limita su pertenencia a otra), y ante la ausencia de evidencias claras que respalden el mayor peso de alguna categoría sobre las demás, se ha decidido emplear una técnica de unión no compensatoria. Así, si una parcela pertenece a alguna de las categorías contempladas, se le asocia el valor máximo, mientras que el valor

mínimo se aplica a aquellas parcelas que no cumplen ninguna de las condiciones. El mapa numérico de elementos relacionados con la presencia de riego para 2008, sólo admite dos valores: el valor 0 cuando una parcela no cumple ninguna de las cuatro condiciones posibles, y el valor 100 cuando cumple cualquiera de ellas.

Por último, en el caso del mapa de índice de vegetación de la imagen SPOT, al tratarse de un mapa numérico, el único proceso necesario ha sido el de normalización. Dentro del proceso EMC resulta necesario que los valores de los criterios empleados se mantengan dentro de un rango de valores común al efecto de evitar soluciones sesgadas hacia las variables que alcancen los valores más elevados (Romero, 1993). Dentro de todos los análisis EMC realizados en el presente trabajo todos los criterios han sido normalizados a una escala que varía entre 0 y 100. Para todos los mapas de índice de vegetación, el proceso de normalización ha consistido en convertir en 0 todos los valores negativos o nulos y en realizar una expansión lineal hacia el valor 100 de los restantes valores tras eliminar el 1% de la cola superior del histograma.

Así, se han definido los criterios a incluir en la evaluación multicriterio para la determinación de la viña regada en 2008. El desarrollo metodológico ensayado para 2008 ha servido como experiencia previa para el diseño de un desarrollo más completo y ajustado que ha sido aplicado sobre los datos de 2009, y que es el que se presenta a lo largo de este capítulo.

ii) En **2009**, la disponibilidad de los datos de campo recogidos en 2008 y del mapa de viña en riego elaborado para el mismo año ha permitido la revisión del proceso de asignación de valores numéricos a las variables cualitativas de interés. Para ello, se han analizado las relaciones existentes entre las categorías de los criterios de “*cambio de uso*” y “*elementos relacionados con la presencia de riego*” con los datos del año 2008 disponibles. Este análisis ha sido de tipo numérico por lo que las conclusiones extraídas quedan respaldadas por mediciones reales y cuantificadas, de forma que son válidas para sustituir a las presunciones previas.

En primer lugar, se ha estudiado la relación existente entre el mapa de “*elementos relacionados con el riego*” y el mapa de viña regada en 2008. Las categorías contempladas en este criterio se han comparado por separado con la distribución de viña regada obtenida para 2008. En la Tabla 28, se recoge el porcentaje del total del viñedo estimado como seco/regadío para cada categoría.

Tabla 28. Relación entre el criterio de elementos relacionados con la presencia de riego y el mapa de viña

VIÑA 2008	Porcentaje del total de viñedo contenido en alguna categoría (%)			
	Referencia_Alberca	Referencia_Campo	Referencia_Pozo	Referencia_FI
<b>SECANO</b>	7,2%	0,8%	3,0%	11,2%
<b>REGADÍO</b>	37,5%	19,4%	14,9%	64,4%
<b>% Riego</b>	83,9%	96,0%	83,2%	85,2%

Lógicamente, el mapa de riego de 2008 muestra una alta correlación con el mapa de factores relacionados con la presencia de riego, ya que este último mapa ha sido empleado como criterio para su obtención. No obstante, esta primera aproximación revela que el porcentaje de riego asociado a cada categoría resulta elevado, lo cual confirma la capacidad explicativa de este criterio. Además, se observan algunas diferencias entre las distintas categorías que invitan a seguir ahondando en el análisis. Para ello, se ha cuantificado el porcentaje de viña en riego cuando una parcela se encuentra incluida en una única categoría, en dos de ellas al mismo tiempo, en tres o en el conjunto de las cuatro categorías, distinguiendo entre todos los casos posibles.

Tabla 29. Relación entre el mapa de viña regada en 2008 y las diferentes categorías asociadas al criterio de elementos relacionados con la presencia de riego

Porcentaje de riego observado en cada combinación de categorías (en azul) / Valor numérico asociado al criterio para cada combinación (en verde)				
Por parejas	Solo Alberca	Campo + Alberca	Pozo + Alberca	FI + Alberca
	67,4%	95,0%	64,3%	86,6%
	40	90	30	70
	Alberca + Campo	Solo campo	Pozo + Campo	FI + Campo
	95,0%	91,4%	93,1%	95,7%
	90	80	90	90
	Alberca + Pozo	Campo + Pozo	Solo pozo	FI + Pozo
	64,3%	93,1%	57,2%	80,8%
	30	90	20	60
	Alberca + FI	Campo + FI	Pozo + FI	Solo FI
	86,6%	95,7%	80,8%	79,2%
	70	90	60	60
Por tríos	Alberca + Campo + Pozo		Alberca + Campo + FI	
	93,9%		95,8%	
	90		90	
	Alberca + Pozo + FI		Campo + Pozo + FI	
	85,9%		97,1%	
	70		100	
Todos	Alberca + Campo + Pozo + FI			
	98,3%			
	100			

El análisis detallado muestra diferencias sustanciales entre las diferentes combinaciones. En la aproximación para 2008, no se contó con elementos de juicio válidos para atribuir valores numéricos ajustados a cada categoría del mapa de “elementos relacionados con la presencia de riego”, de forma que a todas las categorías se les asignó la misma importancia. Sin embargo, los porcentajes observados en la Tabla 29 muestran la

existencia de diferencias significativas entre las categorías del criterio en relación a la posibilidad de existencia de riego asociada a la presencia de cada una de ellas.

Teniendo este hecho en cuenta, se ha considerado que una relación del 50% en el porcentaje de regadío / secano observado en las parcelas incluidas en cada combinación de categorías sería la propia de una variable sin ninguna capacidad explicativa, mientras que una discriminación perfecta del riego definiría el valor máximo asociable al criterio. En base a esta escala, (0 para un porcentaje del 50%; 100 para el valor máximo) se han definido los valores que han sido asociados a cada una de las combinaciones posibles en las variables cualitativas del criterio, y que se muestran dentro de la Tabla 29.

En segundo lugar, se ha procedido a analizar el criterio de "*cambios de uso*". Como punto de partida se ha calculado el porcentaje de viña regada para el año 2008 para cada categoría del criterio, desglosando los resultados por segmento territorial (ver Tabla 30).

Tabla 30. Porcentaje de viña regada en 2008 para cada categoría del criterio de cambios en el uso del suelo

ZONA	CATEGORIAS DEL CRITERIO DE CAMBIO DE USO				
	V87	H87	H87: H8404p	V87: H8804	H87: H8404
01	30.1%	28.9%	51.5%	40.9%	54.3%
02	10.0%	6.4%	13.7%	14.3%	11.3%
03	45.3%	43.9%	62.9%	62.9%	68.3%
04	50.0%	57.2%	59.1%	82.0%	86.5%
05	44.4%	37.5%	53.6%	66.5%	83.6%
06	46.3%	58.3%	55.0%	80.1%	73.7%
07	10.3%	12.3%	30.0%	60.7%	66.7%
08	52.8%	64.9%	76.2%	81.3%	85.2%
09	16.8%	37.8%	58.3%	70.0%	83.4%
10	17.6%	16.5%	36.4%	40.9%	53.5%
11	64.9%	76.8%	83.2%	91.2%	95.0%
12	69.6%	62.5%	62.7%	72.3%	81.7%
13	21.4%	36.8%	65.4%	68.9%	84.8%
14	30.2%	35.2%	56.4%	59.4%	76.5%
15	26.6%	36.5%	62.5%	59.2%	71.9%
16	49.1%	49.0%	57.1%	69.7%	70.6%
17	37.2%	44.5%	74.2%	79.0%	84.7%
18	50.6%	43.9%	71.3%	78.6%	76.3%
19	18.5%	22.9%	59.2%	66.8%	77.0%
20	56.2%	53.9%	65.5%	76.3%	76.7%
21	15.4%	15.0%	31.7%	24.6%	27.6%
22	18.0%	22.6%	33.7%	29.2%	51.2%
23	26.1%	45.0%	67.8%	56.1%	73.7%
24	15.5%	38.5%	60.3%	62.0%	91.4%
25	37.2%	24.8%	34.1%	37.0%	49.4%

Este cálculo se ha realizado de forma separada para cada una de las zonas resultado del proceso de segmentación. Se observa que los valores asignados a cada categoría en el proceso de elaboración del mapa de 2008 (0, 25, 50, 75 y 100, según se ordenan en la tabla) no guardan una relación directa con la variación en los porcentaje de riego.

La relación existente entre las diferentes categorías no sigue un patrón claro, apreciándose, en muchas de las zonas, que el orden en la cantidad de riego asociada a cada categoría, resulta diferente del esperado. Esta variabilidad se agrava ante el hecho de que el análisis se ha realizado entre mapas dependientes entre sí, y motiva la necesidad de buscar un método que permita realizar una transformación más ajustada de las categorías originales del mapa de cambio de usos.

Por otro lado, se aprecia que las categorías asociadas a la existencia de riego de herbáceos o una cubierta vegetal muy elevada del viñedo presentan valores muy superiores en los porcentajes de viña detectada como riego. Este hecho refuerza la consideración seguida acerca de la mayor probabilidad de existencia de riego en aquellas parcelas que han sido transformadas a viña contando previamente con instalación de riego en uso.

En el resto de los casos, los juicios de valor seguidos para dar valores a las categorías no quedan respaldados, no observándose relación a partir de los datos disponibles. Los órdenes de magnitud de los valores establecidos tampoco son apropiados.

Con objeto de mejorar la caracterización del criterio se ha procedido a comparar, desglosando por zona, el mapa asociado al criterio de cambios de uso con el índice de vegetación de 2008, y además, teniendo en cuenta el criterio empleado de elementos relacionados con el riego (Ver Tabla 30). De esta forma, se quiere profundizar en el conocimiento de la incidencia de cada categoría del criterio de “*cambios de uso*” en la probabilidad de existencia de riego.

El mapa de índice de vegetación es la variable que ha mostrado un mayor peso dentro del proceso llevado a cabo en 2008 para la discriminación del riego en la viña, por lo que se ha tomado como referencia para analizar las diferencias existentes en las categorías de cambio de uso. El hecho de que se trate de un mapa cuantificado, facilita el análisis numérico de comparación entre categorías.

Por otro lado, el mapa de elementos relacionados con el riego se ha empleado como dato de apoyo con objeto de validar una posible hipótesis relacionada con la falta de independencia entre los criterios. En este contexto, se ha considerado la existencia de una potencial relación entre los valores a asignar a las diferentes categorías del criterio de cambio de uso y el grado de intensificación que ha sufrido la actividad agraria (en especial el riego) en cada una de las zonas. Así, en zonas donde resulta mayor el porcentaje de viña para la que se ha pedido concesión para el riego con aguas subterráneas, o donde se ha apreciado mayor densidad en el riego, la viña ya presente en el año 1987 tendría una mayor probabilidad de haber sido puesta en riego. Por otro

lado, en las zonas donde se haya apreciado menor intensificación resultaría más probable que las viñas antiguas se mantengan como secanos o que las nuevas plantaciones no lleven asociado regadío.

Para facilitar este análisis los datos de la Tabla 31, se encuentran ordenados por zonas, de menor a mayor según el porcentaje de viñas con “*elementos relacionados con la presencia de riego*” en relación al total de viñedo en cada zona.

Tabla 31. Relación entre el mapa de índice de vegetación para verano de 2008 y las diferentes categorías asociadas al criterio de cambios en el uso del suelo

% Viña con elementos relacionados con riego	ZONA	VALORES MEDIOS DE ÍNDICE DE VEGETACIÓN EN 2008 POR CATEGORIAS DEL CRITERIO DE CAMBIO DE USO				
		V87	H87	H87: H8404p	V87: H8804	H87: H8404
11,3%	25	8,3	10,1	12,7	10,4	13,5
18,1%	7	10,0	10,3	14,1	15,6	16
30,0%	2	10,5	10,1	11,0	12,0	11,8
34,8%	15	12,2	11,7	13,1	14,1	14,4
35,3%	10	9,2	9,3	11,8	11,2	11,3
36,1%	13	10,9	11,7	14,0	14,8	16,2
37,4%	12 (*)	16,5	18,0	18,5	19,2	20,1
38,2%	21	10,6	10,5	12,1	13,1	13,7
38,4%	9	11,1	11,8	13,7	15,2	15,4
39,1%	22	11,8	12,0	14,0	14,2	14,8
43,9%	23	11,8	12,3	15,2	15,2	15,6
50,2%	18	11,3	10,4	12,8	13,5	13,3
53,8%	24	12,5	12,3	14,8	15,2	16,8
55,3%	14	10,1	10,8	10,7	11,5	12,4
55,8%	1	10,2	9,6	10,7	11,7	11,9
62,2%	19	14,0	12,4	19,5	16,5	20,3
64,7%	8	12,2	12,1	13,7	14,5	14,2
69,2%	4	11,0	11,5	13,2	14,3	14,5
70,6%	5	13,5	12,8	14,3	16,1	16,2
71,3%	20	13,8	14,1	15,4	17,1	16,2
73,4%	16	13,5	13,1	13,8	16,0	14,8
74,0%	17	14,8	14,5	18,2	18,3	17,8
83,2%	6	13,8	13,1	16,0	19,2	19,2
86,5%	11	13,5	14,2	17,3	18,2	18,6
89,9%	3	14,5	14,0	14,5	16,0	16,3

(\*) Esta zona corresponde a la Zona Regable de Peñarroya, atendida en gran parte con aguas superficiales. Por ello, el dato de % de viña asociada a elementos de riego no se corresponde con el grado real de intensificación agraria, y el dato aparece fuera de lugar.



El análisis de los datos obtenidos permite la extracción de conclusiones útiles para la revisión del proceso de asignación de valores:

- Las categorías relacionadas con la presencia de riego en algún momento del periodo analizado (V87, H8804 y H87:H8404) adoptan los valores medios más elevados de índice de vegetación en todas las zonas. Este hecho vuelve a corroborar la utilidad del criterio.
- La categoría H87:H8404 resulta la más estable, comportándose de forma independiente del porcentaje de viña asociado a elementos de referencia del riego. En las restantes categorías existe una cierta relación entre ambos criterios, por la que los valores medios del índice tienden a incrementarse según aumenta el porcentaje de viña relacionada con riego.
- En las categorías asociadas a la ausencia de riego de herbáceos de verano y de viña de alta densidad (V87 y H87), la relación entre criterios sigue un patrón de tipo sigmoideal, según el cual los valores de índice de vegetación más bajos se agrupan en las zonas con menores porcentajes, mientras que los valores más altos se corresponden con porcentajes superiores al 60%.

Teniendo en cuenta estas observaciones se ha procedido a agrupar las zonas en intervalos de acuerdo al grado de intensificación agraria de cada una, con objeto de evaluar las diferencias en los valores medios del índice.

Tabla 32. Relación entre el mapa de índice de vegetación para verano de 2008 y las diferentes categorías asociadas al criterio de cambios en el uso del suelo, por grupos.

% Viña con elementos relacionados con riego	CATEGORIAS DEL CRITERIO DE CAMBIO DE USO				
	V87	H87	H87: H8404p	V87: H8804	H87: H8404
<b>0-40%</b>	10.6	10.8	13.4	13.2	17.1
<b>40-60%</b>	11.8	11.9	14.5	15.6	15.4
<b>60-80%</b>	13.6	12.7	15.2	16.5	16.1
<b>80-100%</b>	13.7	13.2	15.9	17.8	18.0

Esta agrupación mejora la identificación de los patrones existentes, por lo que se ha mantenido esta división para realizar la asignación de valores.

El proceso de transformación de los valores se ha adaptado a la relación observada entre cambios de uso del suelo e intensidad de la actividad agrícola de regadío, obteniéndose unos valores que mejoran la cuantificación de las variables cualitativas definidas para el criterio.

Los valores han sido ajustados de acuerdo a las diferencias apreciadas entre categorías y calculados separadamente para cada zona en función del porcentaje de viñado que aparezca ligado a elementos relacionados con la existencia de riego en la viña. De esta

manera, se recoge de una forma más apropiada la interrelación observada entre ambos factores.

Las modificaciones introducidas en la escala numérica asociada a los cambios observados en el uso del suelo se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33. Valores numéricos asociados al criterio de cambio de uso.

% Viña con elementos relacionados con riego	CATEGORIAS DEL CRITERIO DE CAMBIO DE USO				
	V87	H87	H87: H8404p	V87: H8804	H87: H8404
<b>0-40%</b>	0	0	40	40	100
<b>40-60%</b>	0	0	50	100	100
<b>60-80%</b>	40	0	60	100	100
<b>80-100%</b>	40	0	60	100	100

Por último, dado el carácter permanente del cultivo, y el posible mantenimiento de las prácticas agrícolas de riego en los casos en que se dispone de la infraestructura necesaria, se ha considerado que la probabilidad de existencia de riego determinada para el año 2008 es un indicador válido para la estimación de la existencia de riego en 2009.

Con objeto de incluir el criterio de permanencia en el riego, se ha optado por cuantificarlo dentro de los criterios de elementos asociados a la presencia de riego y cambio de uso, considerándose el criterio de índice de vegetación como propio de cada año estudiado. Para incorporar la existencia de riego en 2008 se ha tenido en cuenta la probabilidad observada dentro del análisis EMC realizado. Los resultados del análisis han sido transferidos a una escala de probabilidad (contenida entre los umbrales de 0 y 100) en la que el valor 50 marca el mínimo a partir del cual una parcela ha sido considerada en regadío en cada zona. El procedimiento seguido se describe en detalle dentro del capítulo 5.2.3.2.

La disponibilidad de mapas de probabilidad de riego para 2008 ha permitido definir cuatro tipos de viña en relación a la posibilidad de existencia de riego:

- Probabilidad reducida: Valores menores de 35, correspondientes a viñas observadas claramente como secanos.
- Probabilidad baja: Valores comprendidos entre 35 y 50, asociados a viñas consideradas como secanos pero que han estado próximas a poder haber sido clasificadas como regadíos.
- Probabilidad media: Valores comprendidos entre 50 y 65, relacionados con viñas clasificadas como riego, aunque posiblemente la cubierta vegetal no sea demasiado extensa, y por tanto las dotaciones empleadas hayan podido ser reducidas.

- Probabilidad elevada: Valores superiores a 65, asociados a viñedos en regadío donde las diferencias frente a los secanos resultan apreciables.

De acuerdo a esta división, los valores de los dos criterios citados han sido modificados (ver Tabla 34), llegando al conjunto de valores finalmente empleados dentro del proceso de evaluación multicriterio para el año 2009.

Tabla 34. Modificaciones finales de los valores de los criterios realizadas en función de la probabilidad de riego observada en 2008.

Probabilidad de existencia de riego en 2008	Valores del criterio de “cambio de uso”		Valores del criterio de “elementos relacionados con el riego”	
	Previo	Final	Previo	Final
BAJA			0	10
MEDIA	0	20	0	20
ELEVADA	0	50	0	50
	40	60	20	60
	50	70	40	70
	60	80	60	80
			70	90
			>70	100

#### 4.3.2.3. Combinación de los criterios para la elaboración de un mapa de probabilidad de presencia de riego

La definición completa de criterios, en forma de mapas de aptitud y restricciones, proporciona evidencias que conforman la base necesaria para la toma de decisiones. En nuestro caso, la decisión se refiere a la discriminación de la presencia / ausencia de riego en cada una de las parcelas de viña incluidas dentro de los acuíferos sobreexplotados en la Cuenca Alta del Guadiana.

Después de construir criterios que se encuentren relacionados con el objeto del análisis, resulta necesario encontrar una regla que permita su combinación de forma que se optimice la capacidad de decisión. Esta regla de decisión se define como el procedimiento que permite la obtención de una evaluación particular a partir de un conjunto de criterios (Gómez y Barredo, 2005).

El resultado de la aplicación de las reglas de decisión es un conjunto de coeficientes de ponderación que permiten la combinación de los diferentes criterios con objeto de obtener información relacionada con la solución del problema propuesto. Así, basándonos en la regla de decisión, la unión de los criterios (tanto mapas de aptitud como restricciones) nos permite obtener mapas de idoneidad para la ubicación de cada categoría del mapa de distribución del riego.

De manera general, las reglas de decisión pueden agruparse en dos categorías según estén basadas en aproximaciones objetivas o subjetivas (Barba–Romero y Pomerol, 1997).

Los métodos derivados de juicios de valor con un cierto componente subjetivo resultan los más empleados dentro de los procesos de evaluación multicriterio, fundamentalmente debido a la imposibilidad a la que deben enfrentarse muchos estudios para cuantificar a partir de datos medibles, tanto variables críticas en la evaluación, como su importancia relativa. Dada su importancia, dentro del presente trabajo de investigación, se ha realizado una aproximación de este tipo, para lo cual se ha aplicado el método de comparación por pares.

Este procedimiento se basa en la construcción de una matriz cuadrada cuyo tamaño se ajusta al del número de criterios a ponderar. Los factores son comparados de dos en dos, realizando apreciaciones acerca de su importancia relativa con las que se rellena la matriz. A partir de estos datos se calcula el ortovector (o eigenvector) principal, que proporciona los pesos para cada criterio así como el eigenvalor, que ofrece una medida relacionada con la consistencia de las valoraciones efectuadas (Saaty, 1980).

La escala de medida seguida para la valoración de la importancia relativa de la comparación entre variables ha sido la establecida por el propio autor del método (Saaty, 1980) que ordena la prioridad de un criterio sobre otro en función de una escala entre 1/9 y 9, para la que se pueden adoptar los siguientes valores:

Tabla 35. Escala para la comparación de criterios según el método de Saaty

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extrema	Muy intensa	Intensa	Moderada	Igual	Moderada	Intensa	Muy intensa	Extrema
Grado de importancia relativa (Menos importante)					Grado de importancia relativa (Más importante)			

De acuerdo con esta escala, y en base a la experiencia recogida a lo largo de las campañas de campo, se ha rellenado la matriz de comparación por pares, a partir de la cual se ha hallado el vector que contiene los valores de ponderación y el ratio de consistencia, que ha resultado aceptable.

Los valores incluidos en la matriz no reflejan ningún dato respaldado por medidas directas, sino que responden a la importancia relativa entre criterios de acuerdo a la opinión adquirida durante la toma de datos en campo. Se ha considerado el criterio de índice de vegetación como el más ajustado, ya que se ha constatado, en muchas ocasiones, que valores máximos en los restantes criterios no garantizan la existencia de riego.

Tabla 36. Comparación por pares para la definición de valores de ponderación para los criterios

	Índice de vegetación	Cambio de uso	Referencia de riego	Ponderación
Índice de vegetación	1			0.714
Cambio de uso	1/5	1		0.143
Referencia de riego	1/5	1	1	0.143

Esta ponderación tiene un carácter general para todo el ámbito de estudio, ya que los juicios de valor no han podido ser ajustados en función de criterios de zonificación.

La aproximación subjetiva queda sujeta a una fuerte incertidumbre y puede resultar poco precisa, así como desligada de la variabilidad en las características del territorio. Por ello, en esta Tesis, se opta por profundizar en el empleo de métodos de tipo objetivo, aprovechando la disponibilidad de una amplia muestra de datos de campo que puede ser empleada para llevar a cabo una ponderación relativa de los criterios.

Para la ponderación de las variables consideradas se ha valorado el uso de dos técnicas diferentes: la regresión multilogística y el empleo de una red neuronal multicapa, habiéndose elegido el empleo de la primera de las técnicas.

El uso de redes neuronales multicapa resulta una aproximación cada vez más frecuente en procesos de clasificación, estando concebidas como herramientas que tratan de simular el comportamiento de un cerebro humano ante problemas de tipo espacial. Se definen como una función matemática compleja no lineal, que es capaz de convertir datos espaciales de entrada en información procesada con un significado diferente (Tso and Mather, 2001).

Se componen típicamente de un conjunto formado por una capa de entrada (*input layer*), una capa de salida (*output layer*) y varias capas escondidas (*hidden layers*). Cada capa contiene una serie de nodos o neuronas, que se encuentran conectados entre sí y que contienen diferentes ponderaciones e intensidades de conexión. Mediante una red neuronal de al menos tres capas, resulta posible aproximar con gran exactitud cualquier función polinomial, aunque el proceso operativo se comporta como una caja negra.

Las muestras son introducidas a partir de la capa de entrada, realizándose una ponderación entre los valores de las muestras y las variables empleadas. Se establece un sistema de conexiones entre nodos, asociándose cada nodo receptor con la suma de las señales ponderadas que recibe desde el conjunto de nodos de la capa anterior con los que se encuentra conectado. Después de una fase de entrenamiento, durante la cual se realiza un proceso de aprendizaje, se obtienen una serie de pesos, para cada nodo, que permiten realizar un proceso de clasificación.

Por otro lado, se ha valorado la regresión multilogística, que resulta un tipo de análisis de regresión que normalmente se emplea en la estimación de un modelo que describe la relación entre una o más variables independientes continuas y una variable dependiente. Consiste en la realización de una operación de regresión bilineal, en la que se realiza una aproximación a una variable dependiente.

La base teórica del procedimiento asume que la probabilidad de que la variable dependiente tome el valor de la unidad (respuesta positiva) sigue un patrón de curva logística, pudiéndose estimar su valor mediante la siguiente expresión (Clark y Hosking, 1986):

$$P(y=1 | X) = \exp(\sum BX) / (1 + \exp(\sum BX)) \quad [\text{Ecuación 4}]$$

donde:

P es la probabilidad de que la variable dependiente tome el valor 1.

X es el conjunto de variables independientes

B representa el conjunto de parámetros de correlación.

Para transformar esta expresión en una función de tipo lineal, y poder trabajar con valores fuera del umbral acotado entre 0 y 1 asociado a la función probabilística, se suele aplicar la siguiente transformación, que es conocida como transformación logística:

$$P' = \text{Ln}(P/(1-P)) \quad [\text{Ecuación 5}]$$

Tras este paso, el umbral de valores que puede tomar la función P' queda comprendido entre  $-\infty$  y  $+\infty$ . La aplicación de la transformación logística permite la obtención de una expresión estándar de regresión lineal del tipo:

$$\text{Ln}(P/(1-P)) = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_k \cdot x_k + \text{error} \quad [\text{Ecuación 6}]$$

siendo k es el número de variables independientes empleadas en la regresión.

La resolución óptima de la ecuación de regresión se lleva a cabo mediante el método de estimación de la máxima verosimilitud, que proporciona el conjunto de parámetros que minimizan el término de error en la aproximación a la variable dependiente.

Tras la estimación de los coeficientes se puede resolver la ecuación inicial, obteniendo un valor que estima la probabilidad de que una celda u observación tenga el valor 1, lo que en nuestro caso de estudio se traduce en la probabilidad de que una celda determinada tenga el valor de viña en regadío en el proceso de modelización.

Los mapas que intervengan en el proceso de modelado deben ser de tipo cuantitativo, no pudiéndose emplear variables de tipo cualitativo a no ser que sean transformadas previamente a su uso.

Para el cálculo de los parámetros de la regresión se han empleado:

- como variable dependiente, el mapa de viñedo en regadío y secano obtenido durante las campañas de campo para cada zona.

- como variables independientes, los diferentes criterios definidos en forma de mapas de valores limitados al conjunto de parcelas de viñedo muestreadas en campo (incluyendo regadío y secano).

Tras este proceso, se obtienen los coeficientes de regresión óptimos para cada variable independiente, que se corresponden con los pesos a utilizar dentro del proceso de combinación de criterios, que en este caso se realiza a partir de una suma lineal ponderada. El valor obtenido a partir del proceso de regresión sirve para despejar la función logística ( ver Ecuación 5).

El resultado responde a un mapa (ver Figura 52) donde cada parcela de viña tiene asignado un valor que resulta más elevado cuanto mayor sea la probabilidad de que se encuentre en riego. Este valor (que denominaremos probabilidad EMC) resulta de la multiplicación de los valores que toman los criterios en cada parcela por los coeficientes que maximizan el ajuste entre los criterios y la muestra de campo disponible. Así, el mapa obtenido trata de medir la posibilidad de que una parcela de viñedo se encuentre en regadío en función de los factores de aptitud utilizados.

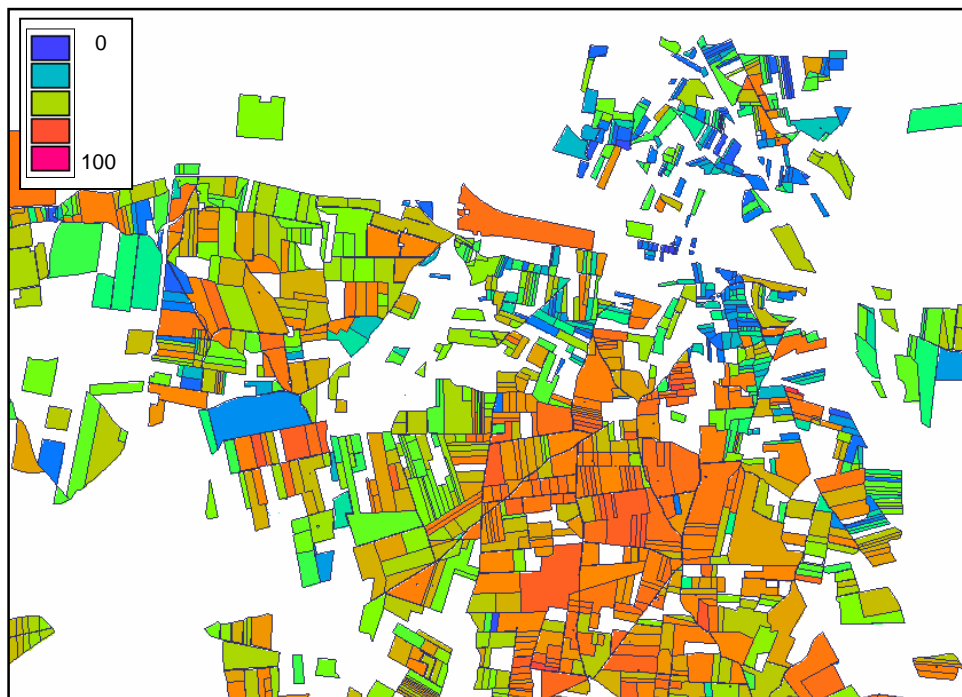


Figura 52. Ejemplo de mapa de probabilidad de existencia de riego elaborado a partir del proceso de evaluación multicriterio

La elección del método de regresión logística sobre la red neuronal multicapa se ha basado en tres factores:

- La mayor transparencia del método de regresión que proporciona parámetros relacionados con la bondad y robustez del ajuste, al mismo tiempo que relaciona linealmente los diferentes pesos. En este sentido, la red neuronal se comporta

como una “caja negra” que no proporciona información acerca de cómo se lleva a cabo el ajuste.

- La idoneidad de la regresión multilogística para el objetivo perseguido centrado en la ausencia / presencia de una única variable. La red neuronal, por el contrario, parece más adecuada para procesos donde sea necesario modelizar en un único proceso el comportamiento de varias variables para un objetivo que pueda ser compartido por diferentes alternativas.
- La realización de un ensayo en una zona de tamaño reducido donde se apreciaron mejores resultados en el mapa obtenido a través del ajuste mediante la regresión multilogística.

Esta decisión se ha considerado adecuada para el caso bajo estudio, no pudiéndose concluir, que el procedimiento elegido sea siempre preferible. La elección de la regla de decisión resulta un proceso propio para cada estudio y que debe ser ajustado a los datos disponibles, los objetivos perseguidos y las características el territorio (Eastman et al, 1993).

#### *4.3.2.4. Ensayo para la selección de los criterios más adecuados para la discriminación de viña en riego.*

Una vez definida la tipología del análisis multicriterio, se ha procedido a realizar un ensayo en una zona concreta con objeto de seleccionar los criterios y condiciones de aplicación que optimizan los resultados. Posteriormente, el proceso será llevado a cabo por separado para la totalidad de las zonas en que se ha dividido el ámbito de estudio, usando los ajustes determinados en este ensayo.

La zona elegida ha sido la de “Villarrubia Sur – Arenas – Villarta”, (etiquetada con el número 5: ver Figura 51), debido a la concurrencia de varios factores de interés:

- Disponibilidad de una amplia cantidad de muestra (en torno a 2.200 ha), que representan más del 18% del viñedo existente en la zona. Dado que la muestra se ha tomado a lo largo de toda la zona, se cumplen los principios de representatividad espacial y poblacional.
- La superficie total de viñedo en la zona (en torno a 12.000 ha) resulta muy extensa, suponiendo más del 7.5% del total de viñedo existente dentro del acuífero de La Mancha Occidental.
- El porcentaje de riego observado en la muestra tomada a lo largo de las campañas de campo se sitúa en el 80,7%, por lo que se trata de una zona de predominio del regadío. Dado que la existencia de riego es el principal factor a analizar, resulta preferible trabajar en una zona de estas características, donde además, la presencia de secano no sea residual.



- La zona cubre diferentes municipios (Daimiel, Villarrubia de los Ojos, Arenas de San Juan, Las Labores, Villarta de San Juan), lo que puede favorecer la diversidad de prácticas agrícolas. Además, se observa una heterogeneidad considerable en el tamaño de las parcelas.
- Disponibilidad del vuelo multiespectral y de la campaña de campo para validación, para poder realizar el contraste de las alternativas manejadas durante el ensayo.

Dentro de esta zona, se han diseñado varias alternativas para la aplicación de la metodología EMC con regresión multilogística, con objeto de definir los ajustes que proporcionen un mejor resultado.

La definición de las alternativas (ver Tabla 37) se ha basado en el empleo de diferentes combinaciones de criterios junto con la inclusión de información adicional de apoyo que modifica las condiciones de contorno del modelo. Los criterios probados han sido:

- Índice de vegetación medio por parcela, elaborado a partir de la imagen Landsat de agosto de 2009 (IV2009)
- Diferencia en el índice de vegetación medio por parcela entre las imágenes Landsat de marzo y agosto de 2009 (DIF\_IV2009)
- Índice de vegetación medio por parcela elaborado a partir de la cobertura SPOT de 2008 (IV2008)
- Cambio en el uso del suelo en el periodo 1984-2009 (CU)
- Viña asociada a elementos relacionados con la presencia de riego (REF\_RIEGO)
- Probabilidad de existencia de viña resultante del análisis EMC realizado para 2008 (EMC2008)

Todos estos criterios han mostrado valores satisfactorios en el test de la V de Cramer, diseñado para medir la capacidad explicativa de variables espaciales.

Por otro lado, se ha tenido en cuenta la información auxiliar relacionada con el tipo de sistema de plantación del viñedo obtenida en el proceso de fotointerpretación realizado para la elaboración del mapa de viña. Aquellos viñedos plantados mediante el sistema de espaldera han de estar en riego, por lo que pueden eliminarse del análisis. Igualmente, los viñedos con un índice de vegetación muy elevado, suelen encontrarse en riego. Así, puede asumirse que la probabilidad de que un viñedo se encuentre regado es casi total siempre que el índice de vegetación medido supere un cierto valor umbral, que en este caso, se ha definido a partir del valor máximo que el índice toma en alguna parcela de la muestra de seco.

Considerando ambas situaciones, los ensayos se han llevado a cabo de forma separada: por un lado, para el total de muestra de campo y parcelas de viña, y por otro, únicamente teniendo en cuenta las muestras y parcelas de viñedo correspondientes a viñas en vaso sin una cubierta foliar ligada muy elevada. De esta manera, el proceso de regresión se

reduce al conjunto de parcelas en el que el empleo del conjunto de criterios en una aproximación multicriterio resulta el método disponible para diferenciar entre el riego y el seco. Bajo esta condición, se supone que el ajuste debería ser más fiable al efectuarse sobre un conjunto de parcelas de características similares. Tanto las espalderas como los vasos con valores muy elevados de índice de vegetación son incorporados posteriormente al mapa de riego.

Tabla 37. Alternativas contempladas para la selección de condiciones de aplicación del método

CÓDIGO	CRITERIOS DE APLICACIÓN
1A	Criterios: DIF_IV2009; CU; REF_RIEGO Aplicación sobre total del viñedo
1B	Criterios: IV2009; CU; REF_RIEGO Aplicación sobre viñedo en vaso sin cubierta vegetal muy elevada
2A	Criterios: DIF_IV2009; EMC2008; CU; REF_RIEGO Aplicación sobre total del viñedo
2B	Criterios: DIF_IV2009; EMC2008; CU; REF_RIEGO Aplicación sobre viñedo en vaso sin cubierta vegetal muy elevada
3A	Criterios: IV2009; EMC2008; CU; REF_RIEGO Aplicación sobre total del viñedo
3B	Criterios: IV2009; EMC2008; CU; REF_RIEGO Aplicación sobre viñedo en vaso sin cubierta vegetal muy elevada
4A	Criterios: DIF_IV2009; IV2008; CU; REF_RIEGO Aplicación sobre total del viñedo
4B	Criterios: DIF_IV2009; IV2008; CU; REF_RIEGO Aplicación sobre viñedo en vaso sin cubierta vegetal muy elevada
5A	Criterios: IV2009; IV2008; CU; REF_RIEGO Aplicación sobre total del viñedo
5B	Criterios: IV2009; IV2008; CU; REF_RIEGO Aplicación sobre viñedo en vaso sin cubierta vegetal muy elevada

Para cada una de estas diez alternativas se ha llevado a cabo el proceso de regresión multilogística con objeto de encontrar los coeficientes que indiquen la ponderación de los diferentes criterios. Posteriormente, se ha elaborado el mapa de viña regada para cada caso (según el procedimiento desarrollado en el capítulo 4.3.2.6) y se ha procedido a realizar la validación de los resultados. Como resultados paralelos del proceso de regresión se obtienen dos parámetros de interés para la comparación de la bondad del ajuste realizado: la pseudo  $r^2$  y el coeficiente ROC (del inglés, *Relative Operating Characteristic*). Ambos parámetros se relacionan, de forma directa, con el nivel de ajuste que se consigue entre las variables independientes y la dependiente dentro del proceso de evaluación.

La pseudo  $r^2$  es una estimación del coeficiente de correlación de Pearson que mide el grado de relación entre las variables incluidas dentro de un proceso de regresión. En este caso, sirve para considerar la relación entre un conjunto de variables en relación a otra.

El coeficiente ROC es un método de uso común para evaluar la validez de un modelo de predicción de la localización de la existencia de una clase, mediante la comparación entre una imagen de idoneidad, que representa la probabilidad de que exista la clase y un mapa de tipo booleano, que recoge las zonas donde realmente existe la clase.

El análisis estadístico de ROC intenta responder a la siguiente pregunta: ¿Cuál es el grado de ajuste entre la existencia de la categoría de interés y las zonas de elevada probabilidad para esta categoría según la regla de decisión? Se trata de valorar el ajuste entre el mapa que refleja el modelo de probabilidad para la existencia de riego en la viña y el mapa que contiene la información de referencia tomada en campo. Dentro del proceso, los errores / aciertos son priorizados y evaluados en función de la probabilidad establecida para caso.

El parámetro de ROC se calcula en base a un número de umbrales sucesivos que reclasifican el mapa de probabilidad en valores de ausencia y presencia, obteniéndose imágenes que pueden ser comparadas directamente con los datos de campo. Así, cada umbral contiene la superficie con probabilidad igual o superior de encontrarse en riego. La comparación entre imágenes se realiza según la Tabla 38.

Tabla 38. Esquema de comparación entre imágenes para el cálculo del parámetro de ROC

		Imagen de referencia (datos de campo)	
		Riego (1)	Secano (0)
Imagen simulada para cada umbral de probabilidad	Valores por encima del umbral (1)	Positivo verdadero	Falso positivo
	Valores por debajo del umbral (0)	Falso negativo	Negativo verdadero

Para cada umbral (normalmente se emplean 100), se genera un vector de datos (x,y), en el que **x** representa el número de falsos positivos del cruce entre imagen umbral e imagen de referencia, e **y** representa el número de positivos verdaderos. Este conjunto de datos, se conectan para formar la curva de ROC, según se muestra en la Figura 53.

El estadístico de ROC representa el área bajo la curva que conecta los puntos. La función que se emplea para calcular esta área es la siguiente:

$$\text{Área bajo la curva} = \sum [x_{i+1} - x_i] \cdot [y_i + (y_{i+1} - y_i)/2] \quad [\text{Ecuación 7}]$$

con  $i$ , variando desde 1 hasta  $n$ , y siendo  $n+1$  igual al número de umbrales considerados.

Un valor de 1 indica que existe un ajuste espacial perfecto entre el mapa de referencia y el mapa de probabilidad de ocupación de la clase. Un valor de 0,5, (representado por la línea discontinua en la Figura 53) es el esperado en una combinación en la que los

valores de la clase de interés hubieran sido asignados de forma aleatoria, y correspondería con una curva en forma de línea recta y pendiente 1. Los valores del coeficiente ROC no pueden medirse en valores absolutos y se utilizan principalmente para comparaciones entre procesos. No obstante, un valor superior a 0.85 se considera indicativo de la existencia de un grado alto de ajuste.

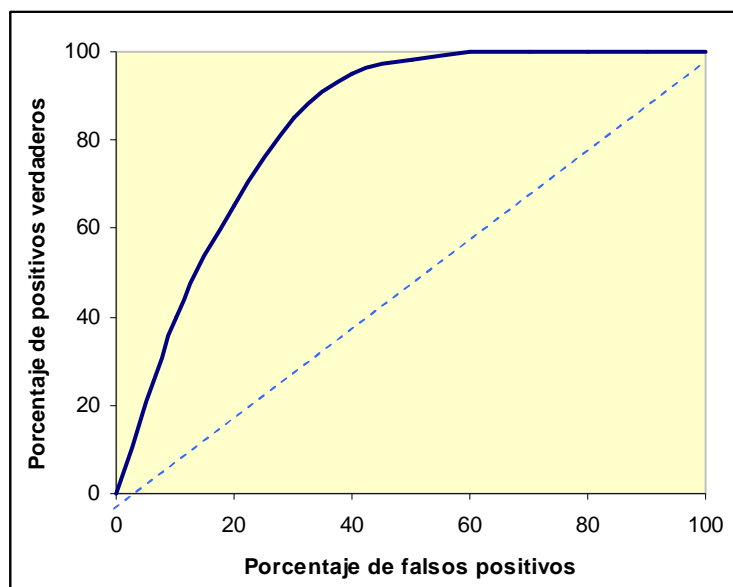


Figura 53. Ejemplo de construcción de curva de ROC

Además, de los dos parámetros obtenidos del cálculo de la regresión, se ha efectuado un proceso de validación centrado en medir la cantidad de acierto obtenida en la elaboración de mapas de viña en regadío procedentes de cada alternativa. En este caso, se ha medido directamente el porcentaje de acierto en la identificación general del riego y seco, junto con la fiabilidad y precisión asociadas.

En base a este conjunto de datos se han evaluado las diferentes alternativas (Tabla 39).

Tabla 39. Resultados del ensayo para la selección de criterios

Código de la alternativa	Pseudo $r^2$	Coeficiente ROC	Fiabilidad media (%)	Precisión media (%)	Precisión de identificación (%)
1A	0.245	0.822	68.8	71.5	<b>79.3</b>
1B	0.360	0.868	69.6	74.2	<b>81.5</b>
2A	0.244	0.826	68.0	69.5	<b>78.0</b>
2B	0.351	0.868	69.3	72.2	<b>79.9</b>
3A	0.260	0.847	63.7	79.1	<b>81.2</b>
3B	0.370	0.890	71.1	81.2	<b>84.0</b>
4A	0.257	0.831	68.7	71.3	<b>79.3</b>
4B	0.362	0.873	74.3	76.6	<b>81.1</b>
5A	0.275	0.851	70.8	79.7	<b>83.5</b>
5B	0.381	0.899	77.2	81.6	<b>86.9</b>

Este ensayo ha servido para definir la alternativa que permite una mejor aproximación, caracterizada por el empleo de cuatro criterios (IV2009, IV2008, CU y REF\_RIEGO) sobre el conjunto de parcelas de viña cultivadas en vaso en las que no se han detectado valores muy elevadas en el mapa de índice de vegetación de 2009.

El proceso de aplicación de la regresión multilogística se ha llevado a cabo, bajo estas condiciones para cada una de las zonas resultado del proceso de segmentación territorial.

#### 4.3.2.5. Determinación de umbrales para la definición de mapas de viña regada

El análisis EMC realiza una evaluación de las alternativas posibles, generando información relacionada con la probabilidad que tiene cada parcela de viña de encontrarse en seco / regadío.

En este punto, hay que resolver una cuestión crítica: *¿cuál es el nivel mínimo de probabilidad a partir del cual consideraremos que una parcela se encuentra en regadío?*

En este sentido, hay que tener en cuenta que el modelo usado no llega nunca a explicar con total precisión la distribución del riego en función de las variables consideradas. En el caso de que el proceso de regresión fuese capaz de justificar el total de las diferencias presentes entre parcelas en seco y en riego, ambas poblaciones serían perfectamente separables, desde un punto de vista estadístico. Sin embargo, en la práctica esto no sucede así, por diversos motivos que se exponen en el capítulo 3.2.2.iii. Por ello, resulta necesario determinar cual es el valor umbral de probabilidad que determina de la manera más ajustada posible la existencia de viña en regadío.

Para identificar este valor umbral, se han elaborado, en cada una de las zonas, mapas de probabilidad según los procesos EMC para las muestras de campo, distinguiendo entre las parcelas en regadío y seco.

Mediante el análisis de los histogramas de ambos tipos de mapas (*Mapas de probabilidad EMC para muestra de viña en regadío - Mapas de probabilidad EMC para muestra de viña en seco*) se trata de determinar un valor umbral que maximiza la superficie de viña en regadío de la muestra incluida, mientras reduce al mínimo posible la superficie de viña de seco considerada.

Este proceso se ha realizado sobre los mapas elaborados a partir de los dos tipos de análisis multicriterio considerados:

- a) según una regla de decisión basada en juicios de valor, y
- b) según un procedimiento de regresión multilogística sobre un conjunto de criterios considerados óptimos de acuerdo a un análisis previo sobre varias zonas de ensayo. Esta segunda aproximación se desarrolla con mayor profundidad.

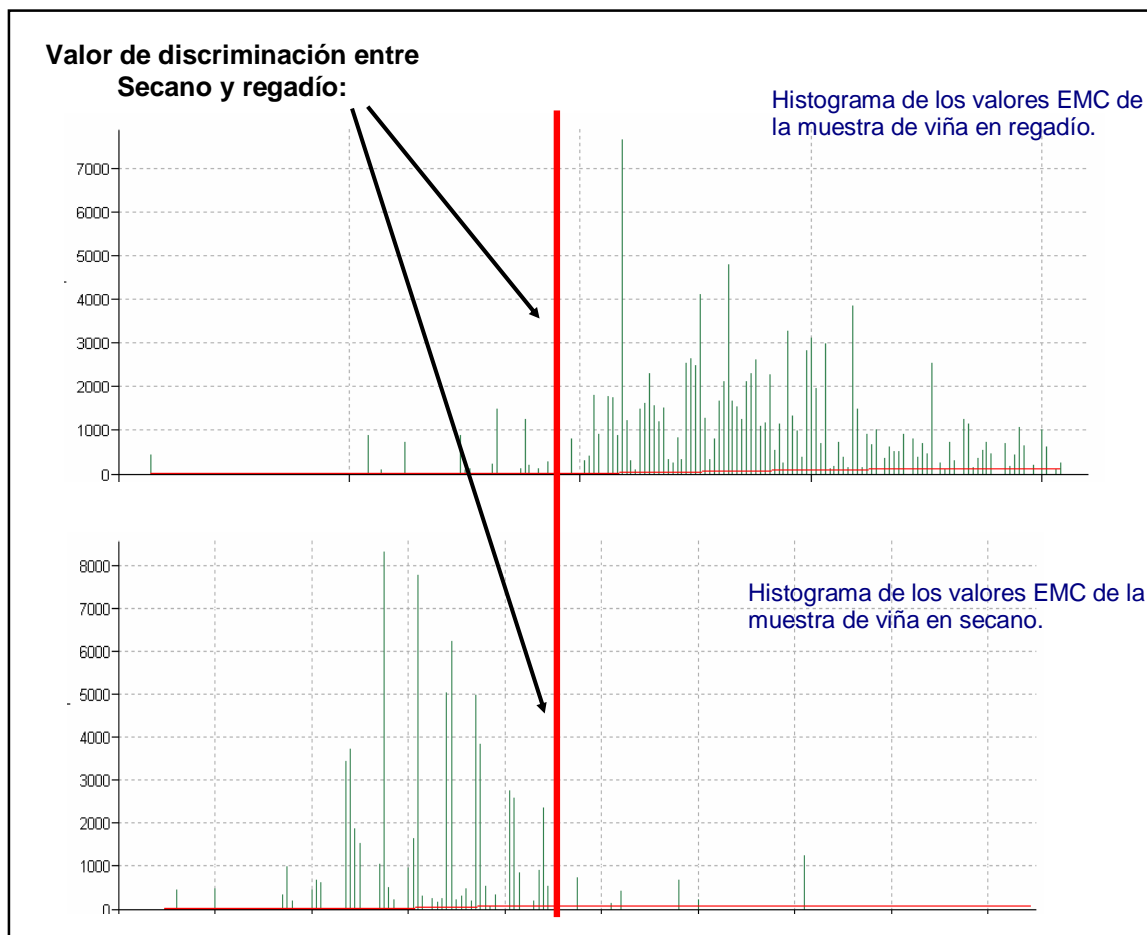


Figura 54. Separabilidad entre viña en seco y viña en regadío. En la imagen superior se muestra el histograma de valores del mapa de probabilidad EMC para la muestra de parcelas de regadío, mientras que en la inferior corresponde al mismo mapa para las muestras de viña en seco. La línea roja marca el valor elegido para separar ambas muestras, que luego es aplicado al total de parcelas de viñedo de cada zona para elaborar el mapa estimativo de viña en regadío.

A partir de las muestras disponibles se han evaluado, para cada zona, cuatro métodos diferentes para la definición del valor umbral que va a ser adoptado para discriminar la viña en regadío de la de seco:

- En primer lugar, se ha llevado a cabo un método de tipo empírico, basado en la comparación visual de los histogramas de ambos tipos de muestra (ver Figura 54). En este análisis se ha buscado el valor que iguale la cantidad de muestra de seco y riego incorrectamente asignada, teniendo en cuenta la forma de los histogramas. Esta aproximación se apoya en la falta de distribución normal de los histogramas, ya que éstos tienden a representar diferentes subpoblaciones.
- Por otro lado, se han determinado otros tres tipos de umbrales, basados en aproximaciones de tipo numérico. En concreto se han calculado los valores que:
  - a) Igualan la cantidad de viña de seco y de regadío incorrectamente asignada
  - b) Minimizan la cantidad total de superficie incorrectamente asignada

- c) Incorporan como regadío el mismo porcentaje de superficie que representa la muestra de riego en relación al total de muestra.

La separabilidad entre mapas sobre las muestras de secano y riego ha variado según la zona analizada, aunque por regla general ha sido posible ajustar adecuadamente el valor umbral. Para ello, se han tenido en cuenta los diferentes criterios, tratando de definir un valor de compromiso entre los diferentes umbrales y teniendo especial consideración para el umbral empírico. En la siguiente tabla se recogen los valores umbrales calculados para el proceso de regresión multilogística, junto con el valor finalmente elegido.

Tabla 40. Valores umbrales para la discriminación el riego para EMC por regresión multilogística

ZONA	VALORES UMBRALES				
	Empírico	Igualación	Minimización	Porcentaje	Valor elegido
01	43.9	42.4	45.5	43.9	43.9
02	45.0	46.5	49.0	46.5	46.5
03	26.1	28.4	26.1	23.9	26.1
04	38.3	39.8	37.6	38.3	38.3
05	46.8	47.4	46.8	46.8	46.8
06	43.5	44.3	44.3	44.7	44.3
07	48.2	49.4	48.2	47.3	48.2
08	50.7	51.3	50.7	50.7	50.7
09	37.8	38.4	38.9	37.8	37.8
10	39.2	39.7	39.2	39.7	39.2
11	19.6	23.9	17.4	17.4	19.6
12	39.0	33.8	39.0	31.2	39.0
13	45.9	44.0	45.9	44.0	45.0
14	24.5	27.0	26.5	25.0	26.0
15	53.8	53.8	48.4	53.8	53.8
16	51.1	51.1	45.6	51.1	51.1
17	51.9	52.6	49.6	47.4	51.9
18	48.2	47.0	42.2	47.0	47.0
19	55.8	52.3	54.7	52.3	54.7
20	55.7	55.7	55.7	55.7	55.7
21	52.0	54.0	49.0	54.0	53.0
22	44.3	44.3	43.5	44.3	44.3
23	44.6	45.4	41.5	45.4	44.6
24	44.3	46.8	35.4	45.6	45.6
25	51.3	50.0	51.3	50.0	51.3

Con carácter general, se observa que las diferencias entre los valores umbrales proporcionados por las diferentes aproximaciones resultan poco significativas. El método empírico presenta la ventaja de introducir una interpretación adicional basada en la forma de los histogramas, aunque presenta el inconveniente de tener un carácter subjetivo. Con

objeto de enmendar esta situación, es conveniente apoyarse en umbrales calculados mediante métodos objetivos.

Tras la selección del umbral, el valor elegido se aplica al mapa de probabilidad EMC sobre el total de parcelas de viñedo existentes dentro de la zona sobre la que se está trabajando. Si la probabilidad es inferior al valor umbral, la parcela se considera como secano, mientras que si supera o iguala el valor umbral, se discrimina como regadío.

Como resultado del proceso se obtienen mapas estimativos de distribución de viñedo en regadío que se han ajustado a la cartografía de parcelas de viña de cada zona y unido en un único mapa final.

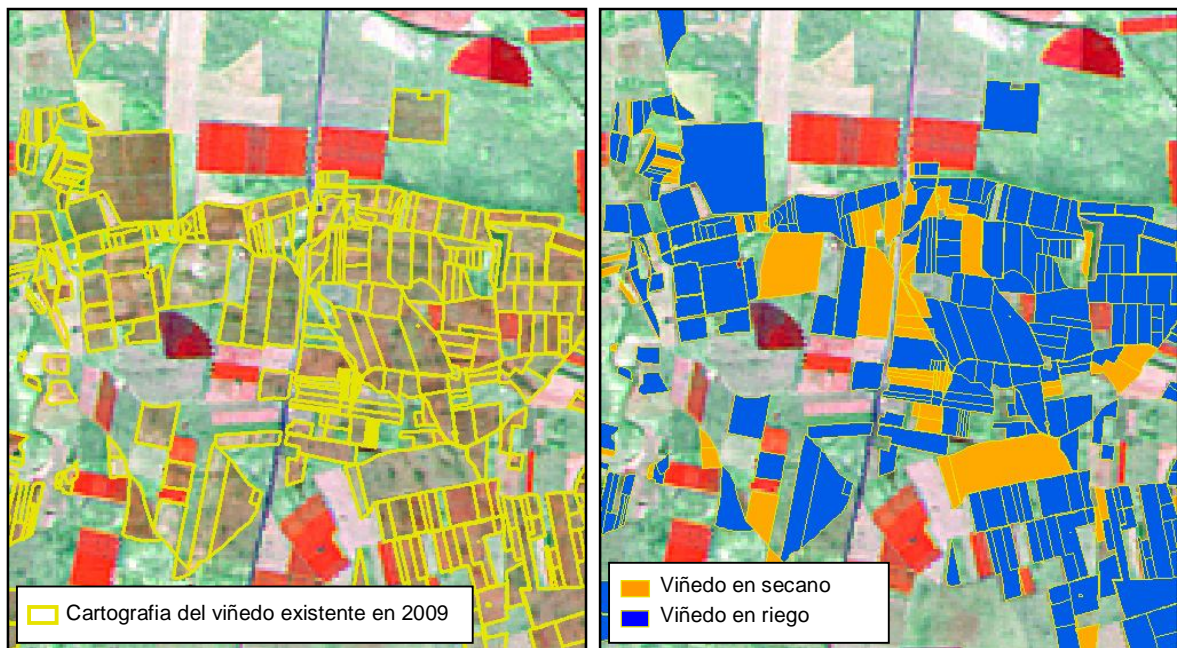


Figura 55. Ejemplo sobre una misma zona del territorio de la cartografía inicial de parcelas de viñedo y del mapa final obtenido tras el proceso de evaluación multicriterio.





## DESARROLLO METODOLÓGICO

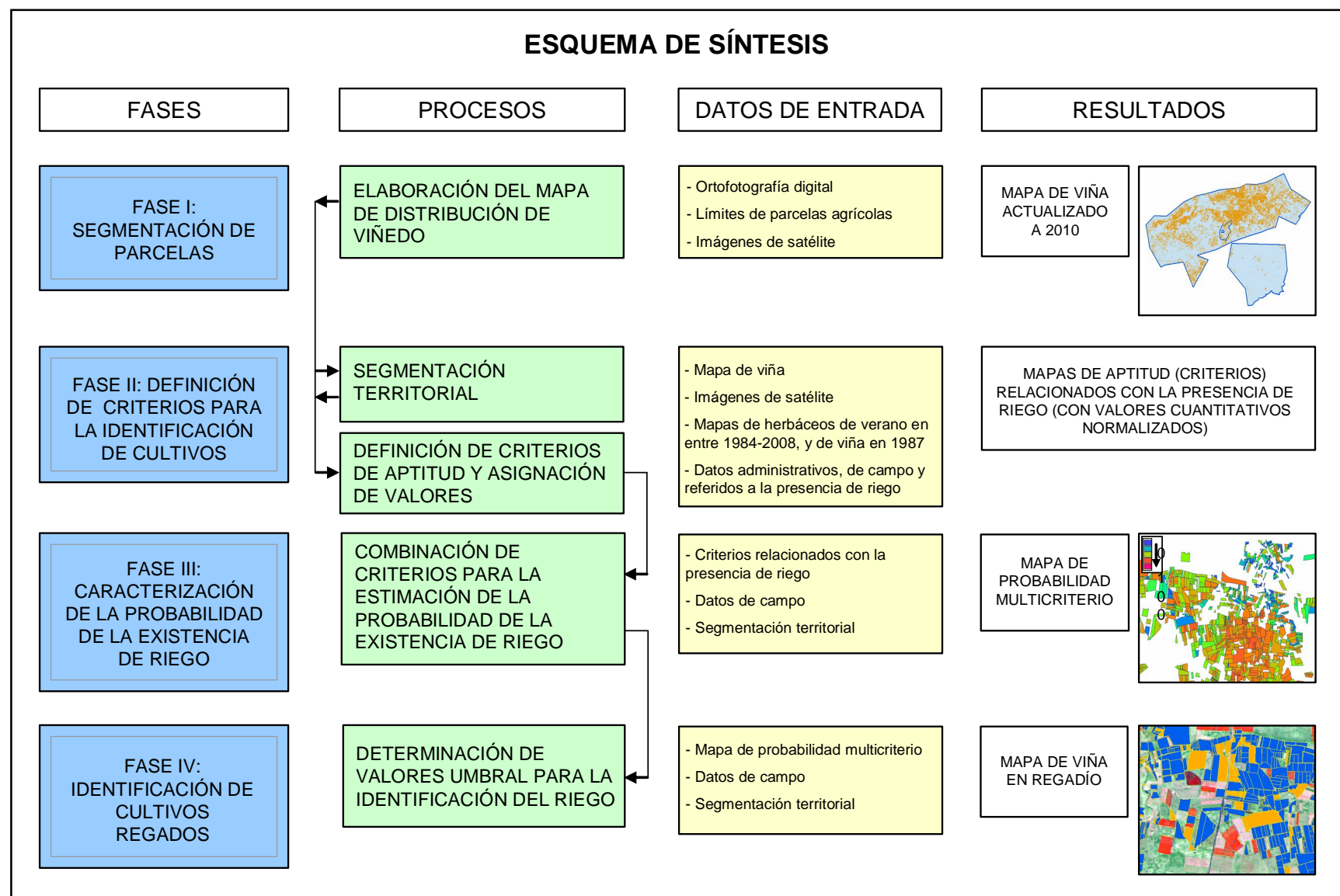


Figura 57. Esquema de síntesis del proceso metodológico para la identificación de viña regada

## 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La implementación del desarrollo metodológico ha permitido la obtención del mapa de cultivos regados en el año 2009, dentro de los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana. Este mapa proporciona información ajustada acerca de la distribución territorial de los cultivos regados. Dado que el riego a partir de aguas superficiales<sup>9</sup> se reduce a la Zona Regable de Peñarroya, la información obtenida permite además la cuantificación de la superficie regada a partir de agua directamente extraída de los acuíferos. A partir de este dato, también es posible realizar estimaciones de la demanda hídrica para regadío a partir de la aplicación de dotaciones teóricas o aproximadas de consumo por hectárea y tipo de cultivo, generando distintos escenarios en función de los datos disponibles.

En este capítulo se expone la cuantificación de superficies regadas para el año 2009, complementada con la elaboración de escenarios de consumo estimado de agua. De esta forma, se describe la cifra aproximada y localización espacial de cultivos regados y extracciones para riego, considerando además, el origen del agua aplicada. Junto a una síntesis general de resultados, se lleva a cabo una diferenciación según metodologías de discriminación (herbáceos regados en primavera, herbáceos regados en verano y leñosos).

Cualquier cuantificación de variables territoriales debe asociarse a un proceso de validación que permita estimar la precisión y fiabilidad de la representación gráfica y de las cifras obtenidas (Richards, 1993). Sólo de esta manera, las conclusiones y decisiones que se tomen basadas en la información generada podrán tener validez y aplicación directa, siempre que se ajusten a las condiciones de contorno obtenidas.

El contraste de resultados ha sido llevado a cabo a partir de la integración de los resultados con datos tomados en campo y se expone en forma de datos numéricos relacionados con la *precisión de identificación* para los diferentes cultivos en regadío, así como con la robustez de los procesos metodológicos empleados.

En el caso del mapa de viña en regadío, el análisis trata de profundizar en aspectos adicionales como son, la calidad de los datos empleados, y la sensibilidad de la aproximación metodológica ante problemas o cambios en los datos de partida.

---

<sup>9</sup> Esta diferenciación resulta incluso discutible, ya que aunque el agua usada para el riego en esta zona es directamente canalizada desde el embalse de Peñarroya, también es cierto que en caso de que se dejase discurrir se infiltraría en el subsuelo y entraría a formar parte del mismo flujo de recursos renovables del que se alimentan el resto de captaciones.

## 5.1. Cuantificación de superficies regadas durante el año 2009

Dentro de los dos **acuíferos sobreexplotados** de la Cuenca Alta del Guadiana se han identificado 157.015 ha de cultivos regados a lo largo del año 2009. En relación a la tipología de los cultivos regados, un 61,4% corresponde a cultivos leñosos (96.510 ha), mientras que la superficie restante se reparte entre herbáceos regados en primavera, con un 29,1% (45.656 ha) y herbáceos regados a lo largo del verano y otoño, con un 9,5%, correspondiente a 14.849 hectáreas.

La superficie en regadío cuantificada en la Unidad Hidrogeológica de La Mancha **Occidental** es de 152.205 hectáreas, de las cuales 148.893 hectáreas corresponden a superficie regada a partir de extracciones de aguas subterráneas, mientras que el resto, 3.312 hectáreas, corresponden a superficie atendida con aguas superficiales dentro del perímetro de la Zona Regable de Peñarroya.

Dentro de los cultivos atendidos con aguas subterráneas, el viñedo resulta el mayoritario con amplia diferencia, con 91.979 hectáreas, lo cual representa casi un 62% del total de superficie regada. El siguiente cultivo en extensión es el cereal, con un riego durante la primavera estimado en 36.063 ha (24,3%). La suma de superficie entre todos los cultivos herbáceos regados durante el verano y otoño asciende a 13.443 hectáreas, lo que supone únicamente un 9,0%.

En la **zona regable de Peñarroya**, se han identificado 2.212 hectáreas de viñedo regado y 1.100 hectáreas de herbáceos cultivados durante el verano, y que se consideran como regados a partir de aguas superficiales.

Dentro del perímetro de sobreexplotación del acuífero del **Campo de Montiel**, la densidad de superficie regada resulta muy inferior, con una superficie total de 4.810 hectáreas. La mayor parte del riego se produce durante la primavera, representando el cereal un 66,3% del total de superficie regada, y las leguminosas un 9,7%. El viñedo ocupa un 16,4%, mientras que la presencia de herbáceos de verano resulta muy reducida, con apenas 306 ha (6,4%).

En la Tabla 41, se muestra la cuantificación del mapa de cultivos regados, distinguiendo según la unidad hidrogeológica en la que se produce el riego y también de acuerdo al origen (subterráneo o superficial) del agua.

Además de las cifras de superficie regada por cultivo, la metodología empleada nos proporciona información detallada acerca de la distribución espacial de los cultivos regados, lo cual permite el análisis a diferentes escalas, así como el desglose de resultados por cualquier unidad territorial de interés.

Tabla 41. Cuantificación de superficies regadas en 2009 dentro de los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana

CULTIVO	Superficie en U.H. de La Mancha Occidental (ha)			Superficie en P.S. del Campo de Montiel (ha)	Superficie Acuíferos Sobreexplotados (ha)
	UH 04.04 - Aguas Subterráneas	Zona Regable de Peñarroya	Total UH 04.04	Total PS 04.06	TOTAL AcSE
<b>HERBÁCEOS PRIMAVERA</b>					
Cereal regado	36.063	0	36.063	3.191	39.254
Ajo y Cebolla temprana	3.206	0	3.206	58	3.264
Leguminosas de forraje	2.475	0	2.475	468	2.943
Otros cultivos	195	0	195	0	195
<b>Total herbáceos primavera</b>	<b>41.939</b>	<b>0</b>	<b>41.939</b>	<b>3.717</b>	<b>45.656</b>
<b>HERBÁCEOS VERANO</b>					
Adormidera	177	0	177	0	177
Alfalfa	660	42	702	94	796
Cebolla	2.919	44	2.963	26	2.989
Girasol	256	0	256	0	256
Hortalizas	99	9	108	15	123
Maíz	806	56	862	152	1.014
Maíz tardío	85	0	85	0	85
Melón o Sandía	6.741	478	7.219	0	7.219
Patata	363	0	363	0	363
Pimiento o Tomate	921	462	1.383	19	1.402
Remolacha	16	0	16	0	16
Riego primavera y otoño	181	0	181	0	181
Riego otoño	107	0	107	0	107
No identificados	112	9	121	0	121
<b>Total herbáceos verano</b>	<b>13.443</b>	<b>1.100</b>	<b>14.543</b>	<b>306</b>	<b>14.849</b>
<b>LEÑOSOS</b>					
Viña regada	91.979	2.212	94.191	787	94.978
Otros leñosos regados	1.532	0	1.532	0	1.532
<b>Total leñosos</b>	<b>93.511</b>	<b>2.212</b>	<b>95.723</b>	<b>787</b>	<b>96.510</b>
<b>TOTAL</b>	<b>148.893</b>	<b>3.312</b>	<b>152.205</b>	<b>4.810</b>	<b>157.015</b>

La estimación del consumo se ha realizado a partir de la selección de escenarios entre varias alternativas, elaboradas para cada tipología de cultivo y unidad hidrogeológica, y que se detallan en los apartados del presente capítulo.

La **estimación de consumo por riego** agrícola en el año 2009 dentro de los acuíferos sobreexplotados del ámbito de la Cuenca Alta del Guadiana es de **301,0 hm<sup>3</sup>**. Esta cifra está sujeta a una elevada incertidumbre ya que el escenario de consumo mínimo entre todos los posibles se sitúa en 246,6 hm<sup>3</sup>, mientras que el máximo sube hasta 385,1 hm<sup>3</sup>. No obstante, los escenarios extremos parecen poco probables, considerándose la cifra estimada como la más plausible, tal y como se justifica dentro de este capítulo.

Dentro del acuífero de La Mancha Occidental, el consumo se estima en 291,6 hm<sup>3</sup>, de los cuales 281,4 hm<sup>3</sup> tendrían su origen en extracciones a través de captaciones de aguas subterráneas, y 10,2 hm<sup>3</sup> provienen de aportes realizados desde el embalse de Peñarroya.

Dentro del perímetro de sobreexplotación de la unidad hidrogeológica del Campo de Montiel, las extracciones estimadas son de 9,4 hm<sup>3</sup>.

En relación al porcentaje de consumo, los cultivos leñosos son los más importantes, suponiendo un 43,9% del total. El riego de herbáceos de verano consume un 29,1% de los recursos empleados, mientras que el 27,0% restante se asocia al riego de cultivos herbáceos durante la primavera.

Tabla 42. Estimación de consumo por riego en 2009 dentro de los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana

CULTIVO	Superficie en U.H. de La Mancha Occidental (ha)			Superficie en U.H. del Campo de Montiel (ha)	Superficie Acuíferos Sobreexplotados (ha)
	UH 04.04 - Aguas Subterráneas	Zona Regable Peñarroya	Total UH 04.04		
HERBÁCEOS PRIMAVERA					
Total herbáceos primavera	75,5	0,0	75,5	5,8	81,3
HERBÁCEOS VERANO					
Total herbáceos verano	78,4	6,7	85,1	2,4	87,5
LEÑOSOS					
Viña regada	125,2	3,5	128,7	1,2	129,9
Otros leñosos regados	2,3	0,0	2,3	0,0	2,3
Total leñosos	127,5	3,5	131,0	1,2	132,2
TOTAL	281,4	10,2	291,6	9,4	301,0

### 5.1.1. Cuantificación de la superficie regada en primavera de 2009

La superficie en regadío cuantificada durante la primavera de 2009 en la unidad hidrogeológica de La **Mancha Occidental** es de 41.939 hectáreas, de las cuales un 86% (36.063 ha) corresponden a cereal en regadío, 3.206 hectáreas a ajo o cebolla temprana regados únicamente durante este periodo, 2.475 hectáreas a leguminosas regadas y 195 hectáreas de otros cultivos, representados por pastos y prados.

Dado que en 2009 el agua para riego en la **Zona Regable de Peñarroya** no comenzó a desembalsarse hasta el mes de junio, se considera que todos los cultivos regados dentro de este perímetro han sido atendidos con aguas subterráneas, y han sido contabilizados dentro de los datos generales de la UH de La Mancha Occidental.

Dentro del perímetro de sobreexplotación del acuífero del **Campo de Montiel**, la superficie regada de cereal se ha estimado en 3.191 hectáreas, que unidas a las 468 cuantificadas de leguminosas y a las 58 de ajo, suman un total de 3.717 hectáreas.

Tabla 43. Superficie de cultivos regados en primavera para cada Unidad Hidrogeológica (UH)

CULTIVO	Superficie regada por UH (ha)	
	UH 04.04	UH 04.06
Cereal con riego de apoyo	9.582	
Cereal regado	18.820	3.191
Cereal con riego intensivo	7.661	
Leguminosas de forraje	2.475	468
Ajo y Cebolla temprana	3.206	58
Otros cultivos	195	-
TOTAL	41.939	3.717

La estimación del consumo se ha elaborado aplicando las distintas dotaciones de consumo proporcionadas por las fuentes de datos disponibles: el Plan de Ordenación de las Extracciones (PO), el Servicio Integral de Asesoramiento al Regadío (SIAR) y las dotaciones de extracción estimadas a partir de las lecturas de caudalímetros situados en las captaciones de agua de explotaciones de riego.

En el caso de la UH 04.04, según el Plan de Ordenación aprobado a consecuencia de la declaración de sobreexplotación del acuífero, la dotación empleada para el riego tanto de cereal como de leguminosas es de 2.000 m<sup>3</sup>/ha. Esta dotación teórica ha sido rebajada a la mitad para las explotaciones clasificadas como riego de apoyo y aumentadas a 2.500 m<sup>3</sup>/ha para los riegos de tipo intensivo. La dotación para el ajo es de 2.500 m<sup>3</sup>/ha.

Las dotaciones del SIAR se han calculado a partir de las recomendaciones efectuadas para las diferentes zonas del acuífero, basadas en la estimación de la evapotranspiración

del cultivo y en las medidas de las estaciones meteorológicas asociadas. En el caso del cereal quedan resumidas en la Tabla 44.

Tabla 44. Estimación de la dotación media SIAR para el cereal en la UH 04.04

ZONA	ET (mm)	P (mm)	Pe (mm)	Nc (m <sup>3</sup> /ha)	Ne (m <sup>3</sup> /ha)
Villarrobledo	291,9	42,8	34,2	2.576	3.680
San Clemente	301,3	53,6	42,9	2.584	3.690
Tomelloso – Alcázar	283,8	21,0	16,8	2.670	3.815
Manzanares	256,2	54,6	43,7	2.125	3.035
Daimiel	307,4	56,0	44,8	2.626	3.750

donde:

*ET* es la evapotranspiración estimada del cultivo, equivalente al aporte de agua necesaria para que el cultivo se encuentre en condiciones óptimas.

*P* es la precipitación total recogida entre el 15 de marzo y el 31 de mayo, periodo en el que se producen las recomendaciones de riego para el cereal.

*Pe* es la precipitación efectiva aprovechada por el cultivo, resultado de multiplicar la precipitación por un coeficiente de 0,8.

*Nc* es la necesidad hídrica del cultivo, resultado de restar el valor de *Pe* a *ET*.

*Ne* es la necesidad efectiva del cultivo, resultado de multiplicar *Nc* por un coeficiente de 0,7 correspondiente a las pérdidas debidas al sistema de riego de aspersión. Este valor se asimila a la dotación real recomendada por el SIAR para el cultivo.

Tomando en consideración la distribución aproximada de cereales en regadío en las zonas de recomendación (cuya delimitación exacta no se encuentra definida), la dotación media considerada para el acuífero se estima en 3.650 m<sup>3</sup> por hectárea y año. Para el caso del ajo se ha realizado un ajuste similar, obteniéndose una recomendación de riego media de 3.785 m<sup>3</sup>/ha.

Ambas dotaciones resultan muy elevadas lo que seguramente se debe a dos factores:

- dentro del balance no se considera la capacidad de almacenamiento de agua en la estructura edáfica con acceso radicular.
- los cultivos no llegan a regarse con las dotaciones teóricas que potencialmente evitarían que el cultivo no sufriese ningún tipo de estrés hídrico durante su desarrollo.

Por otro lado, se han estimado dotaciones para los cultivos regados en primavera a partir de las lecturas de los caudalímetros instalados en captaciones de aguas subterráneas dentro del acuífero. Dado que las lecturas no se encuentran asociadas a superficies específicas de riego, las dotaciones realmente empleadas han tenido que ser estimadas a partir de la interpretación de los datos disponibles: delimitación aproximada de las



explotaciones de riego, lecturas mensuales de caudalímetros y mapas de distribución de cultivos regados.

Esta incertidumbre ha causado que las dotaciones estimadas hayan sido definidas como intervalos, que marcan los valores más frecuentes en aquellas explotaciones donde las lecturas proporcionadas casan con los valores esperados:

- Cereal con riego de apoyo: 500-750 m<sup>3</sup>/ha y año
- Cereal regado con dotación estándar: 1.250-1.500 m<sup>3</sup>/ha y año
- Cereal con riego intensivo: 2.000 m<sup>3</sup>/ha y año
- Ajo o cebolla temprana: 2.000 m<sup>3</sup>/ha y año
- Leguminosas: 1.500-2.000 m<sup>3</sup>/ha y año
- Otros cultivos regados en primavera: 500-1.000 m<sup>3</sup>/ha y año

Para los cultivos de la UH 04.06 del Campo de Montiel, se han considerado tres dotaciones, provenientes de:

- El Plan de Ordenación de Extracciones del acuífero (2.000 m<sup>3</sup>/ha)
- La limitación impuesta por el Régimen de Explotación del acuífero del Campo de Montiel para 2009 (1.524 m<sup>3</sup>/ha)
- La recomendación del SIAR basadas en la estación de Ruidera. (3.965 m<sup>3</sup>/ha)

Teniendo en cuenta los diferentes valores de dotaciones, las extracciones de agua subterránea han sido estimadas en los siguientes escenarios de consumo:

Tabla 45. Escenarios de consumo por UH según dotaciones de consumo.

UNIDAD HIDROGEOLOGICA	CONSUMO SEGÚN DOTACIÓN EMPLEADA (hm <sup>3</sup> /año)			
	Plan de Ordenación	Régimen de Explotación	SIAR	Caudalímetros
UH 04.04	75,5	-	135,0	53,6 – 61,8
PS 04.06	7,5	5,8	14,4	-

Para La Mancha Occidental, las diferencias apreciadas para cada uno de los escenarios resultan muy elevadas. Las dotaciones dadas por las lecturas de caudalímetros no pueden considerarse como una fuente fiable debido a las incertidumbres asociadas a su estimación, y se han tomado con carácter orientativo. Las dotaciones del SIAR sobreestiman considerablemente las extracciones de agua, ya que las recomendaciones se encuentran ajustadas para cultivos que no usen las reservas hídricas del suelo y no sufran condiciones de estrés en ninguna fase de su desarrollo.

El escenario derivado de las dotaciones del Plan de Ordenación se considera como el más fiable, aunque las lecturas de caudalímetros parecen indicar que podría estimar al alza el consumo real.

Para el Campo de Montiel, el escenario más realista es el proporcionado por las dotaciones asociadas al Régimen de Explotación. Dentro de este acuífero, la mayor parte del riego se produce en grandes explotaciones representadas y controladas por la Comunidad de Regantes del acuífero, que tiene instalados caudalímetros en todas ellas. Teniendo en cuenta esta coyuntura, se considera que el riego debe posiblemente ajustarse más a las limitaciones impuestas por el Régimen que a las dotaciones proporcionadas por las restantes fuentes.

### **5.1.2. Cuantificación de la superficie de cultivos herbáceos regada en verano y otoño de 2009**

La superficie de cultivos herbáceos de verano en regadío cuantificada en la Unidad Hidrogeológica de La Mancha **Occidental** es de 14.543 hectáreas, de las cuales 13.443 hectáreas corresponden a superficie regada a partir de extracciones de aguas subterráneas, mientras que el resto, 1.100 hectáreas, a superficie atendida con aguas superficiales dentro del perímetro de la Zona Regable de Peñarroya.

Dentro del riego de herbáceos de verano en el total de la UH 04.04, el cultivo mayoritarios es el melón y la sandía, con 7.220 hectáreas, que representan casi un 50% del total. En un segundo nivel aparece la cebolla (20,3%), con 2.964 hectáreas. Los siguientes cultivos en orden de importancia son: el pimiento y tomate, con 1.383 ha (9.5%), el maíz, (en progresiva disminución dentro del acuífero) con 862 ha (6%), y la alfalfa y prados intensivos, cultivo de muy alta dotación, con 702 ha (4.8%). Los restantes cultivos no representan en ninguno de los casos más de un 3% del total de superficie cuantificada.

En la **zona regable de Peñarroya**, se han identificado 1.100 hectáreas de herbáceos regados durante el verano, y que se consideran como regados a partir de aguas superficiales. Los cultivos mayoritarios, son melón y sandía, con 479 ha (43,5%) junto con el pimiento y tomate, con 462 ha, (42%), representando entre ambos más del 85% de herbáceos de verano dentro del perímetro de riego.

En la Tabla 41, se muestra la cuantificación del mapa de cultivos herbáceos de verano, junto con el desglose según el origen (subterráneo o superficial) del agua empleada para el riego.

En el perímetro de sobreexplotación de **Campo de Montiel**, se han identificado 306 hectáreas de herbáceos en regadío durante el verano, localizadas fundamentalmente en explotaciones de gran tamaño y aplicándose el riego fundamentalmente mediante sistemas de pivot.

El riego de herbáceos en verano presenta una extensión mucho menor que en primavera. El cultivo predominante es el maíz, con casi la mitad de la superficie de riego, que se concentra en solo 5 explotaciones. La alfalfa y prados intensivos para forraje es el siguiente cultivo en extensión, con 94 hectáreas.

La estimación del consumo se ha elaborado aplicando las dotaciones de consumo proporcionadas por las dos fuentes de datos disponibles: el Plan de Ordenación de las Extracciones (PO) y el Servicio Integral de Asesoramiento al Regadío (SIAR).

El Plan de Ordenación, aprobado a consecuencia de la declaración de sobreexplotación del acuífero, establece unas dotaciones variables para cada tipo de cultivo, indicándose además, que en caso de existencia de riego de goteo, éstas deben reducirse en un 15%, al conseguirse una mayor eficiencia en la circulación del agua desde la captación hasta la planta. En los cultivos donde resulta frecuente encontrar el empleo de sistemas de riego tanto de aspersión como de goteo, para poder ajustar el coeficiente de riego se ha realizado una ponderación según el porcentaje de uso de cada tipo de sistema observado en campo.

Las dotaciones del SIAR se han calculado a partir de las recomendaciones efectuadas para las diferentes zonas del acuífero basadas en la estimación de la evapotranspiración del cultivo y las medidas de las estaciones meteorológicas asociadas. Estas dotaciones sirven para estimar las dotaciones netas, (según se describe en la Tabla 44), que han sido calculadas para cada cultivo y zona de recomendación. Posteriormente, se ha estimado una única dotación por cultivo para cada acuífero, ajustada de acuerdo a la superficie aproximada existente de cada cultivo en cada zona de recomendación. Para los cultivos en los que no existe dato de riego según el SIAR, se han mantenido las dotaciones proporcionadas por el Plan de Ordenación. Las dotaciones finalmente consideradas así como los consumos estimados para cada unidad, se recogen en las Tablas 46, 47 y 48, teniendo también en cuenta el origen del agua.

En la unidad de La Mancha Occidental, los dos escenarios de consumo propuestos son muy similares, aunque se observan diferencias apreciables en las dotaciones estimadas para varios cultivos. Por lo general, las dotaciones del SIAR, resultan algo más elevadas, lo cual tiene sentido al estar calculadas bajo la intención de evitar la aparición de periodos donde el cultivo sufra estrés hídrico. Aún así, para dos de los tipos de cultivos más representativos (melón/sandía y pimiento/tomate) las recomendaciones de riego son muy inferiores a las propuestas por el Plan de Ordenación. Teniendo en cuenta que ambos cultivos son de elevado valor añadido, no reciben subvenciones agrícolas y conllevan un alto grado de intensificación orientado al aumento de producción, resulta probable que se produzca una situación de sobre-riego y que las dotaciones realmente utilizadas se acerquen más a las consideradas por el Plan de Ordenación. Por estos motivos, este último escenario es el considerado como más probable y ajustado a la realidad.

Tabla 46. Dotaciones y consumo estimado dentro del total de la unidad de La Mancha Occidental

CULTIVO	U.H. de La Mancha Occidental (TOTAL)			
	Dotación P.O.	Consumo estimado P.O. (hm <sup>3</sup> /año)	Dotación SIAR	Consumo estimado SIAR (hm <sup>3</sup> /año)
Adormidera	3.500	0,6	3.500	0,6
Alfalfa	9.000	6,3	10.300	7,2
Cebolla	6.727	19,9	6.950	20,6
Girasol	2.000	0,5	8.150	2,1
Hortalizas	3.000	0,3	3.000	0,3
Maíz	7.340	6,3	7.400	6,4
Maíz tardío	5.000	0,4	5.000	0,4
Melón o Sandía	5.100	36,8	4.000	28,9
Patata	6.000	2,2	7.500	2,7
Pimiento o Tomate	6.800	9,4	5.350	7,4
Remolacha	8.000	0,1	8.000	0,1
Riego primavera y otoño	7.000	1,3	7.000	1,3
Riego otoño	3.000	0,3	3.000	0,3
No identificados	4.278	0,5	4.278	0,5
<b>TOTAL</b>		<b>85,1</b>		<b>78,9</b>

La estimación de consumo para riego atendido con aguas superficiales, dentro del total de la UH 04.04, se recoge en la Tabla 47, si bien las dotaciones realmente utilizadas deben ser sin duda superiores, ya que no contabilizan las pérdidas por transporte dentro de la red de acequias y canales de la zona regable. En la Tabla 48, aparecen los datos para el perímetro de sobreexplotación del Campo de Montiel.

Tabla 47. Dotaciones y consumo estimado dentro de la unidad de la Zona Regable de Peñarroya

CULTIVO	Zona Regable de Peñarroya			
	Dotación P.O.	Consumo estimado P.O. (hm <sup>3</sup> /año)	Dotación SIAR	Consumo estimado SIAR (hm <sup>3</sup> /año)
Alfalfa	9.000	0,4	10.300	0,4
Cebolla	6.727	0,3	6.950	0,3
Hortalizas	3.000	0,1	3.000	0,1
Maíz	7.340	0,4	7.400	0,4
Melón o Sandía	5.100	2,4	3.900	1,9
Pimiento o Tomate	6.800	3,1	5.150	2,4
No identificados	4.278	0,1	4.278	0,1
<b>TOTAL</b>		<b>6,7</b>		<b>5,5</b>

Tabla 48. Dotaciones y consumo estimado en el P.S. del Campo de Montiel

CULTIVO	Perímetro de Sobreexplotación del acuífero del Campo de Montiel			
	Dotación P.O.	Consumo estimado P.O. (hm <sup>3</sup> /año)	Dotación SIAR	Consumo estimado SIAR (hm <sup>3</sup> /año)
Alfalfa	9.000	0,8	9.000	0,8
Cebolla	7.000	0,2	8.900	0,2
Guisante de verdeo	3.000	0,1	4.050	0,1
Maíz	8.000	1,2	8.000	1,2
Pimiento o Tomate	6.800	0,1	6.800	0,1
<b>TOTAL</b>		<b>2,4</b>		<b>2,4</b>

### 5.1.3. Cuantificación de la superficie de viña y otros leñosos regados en 2009

La superficie en cultivos leñosos en regadío cuantificada en la Unidad Hidrogeológica de La Mancha **Occidental**<sup>10</sup> es de 95.723 hectáreas, de las cuales más del 98% (94.191 ha) corresponde a viña en regadío y el resto (1.532 ha) a otros cultivos leñosos en regadío.

En la cuantificación de la viña existente dentro del acuífero en el año 2009, se han identificado 154.431 hectáreas de viñedo, de las cuales el 61% está en regadío.

En la **zona regable de Peñarroya**, se han identificado 2.212 hectáreas de viñedo en regadío, que corresponden a un 91,5% del total de viñedo dentro de este perímetro.

En el perímetro de sobreexplotación de **Campo de Montiel**, se han identificado 2.607 hectáreas de viñedo, de las cuales, 787 hectáreas han sido discriminadas como viña en regadío. Gran parte de esta superficie se sitúa en explotaciones de tamaño considerable, plantadas en espaldera en la zona central del acuífero.

En la Tabla 49 y en la Figura 58, se recogen la distribución de viña en secano y regadío dentro de las diferentes áreas resultado del proceso de segmentación, lo cual ayuda a analizar los patrones de distribución del riego de leñosos dentro de la zona de estudio.

La comparación de este gráfico con la Figura A.18, del apéndice A.2.3.1, muestra una correlación muy elevada entre los porcentajes de riego estimados para el viñedo y los niveles piezométricos estimados para el acuífero de La Mancha Occidental. Esta relación respalda la hipótesis de que la viña, al no ser generalmente un cultivo de alto valor añadido en la zona, se riega principalmente en las zonas con mayor accesibilidad al agua, con independencia de las características del territorio o de factores climáticos.

<sup>10</sup> Los resultados que se exponen en el presente apartado son los correspondientes a la aproximación metodológica basada en el empleo de la regresión multilogística, ya que este método ha proporcionado unos mejores resultados dentro del proceso de validación (ver capítulo 5.2.3).

Tabla 49. Resultados de la estimación de viña en regadío por zona de segmentación

ZONA	Superficie total de viñedo (ha)	Superficie de viñedo regado (ha)	Porcentaje de viñedo regado (%)
01	6.449,4	3.050,6	47.3%
02	6.080,2	2.189,0	36.0%
03	4.486,7	3.803,4	84.2%
04	1.556,7	1.225,1	74.7%
05	12.165,4	8.109,6	66.6%
06	7.388,4	6.330,8	85.6%
07	2.516,2	478,4	18.9%
08	4.422,1	2.505,3	56.6%
09	2.769,3	1.182,1	42.5%
10	5.829,0	2.420,0	41.5%
11	13.487,4	12.352,8	91.4%
12	2.410,8	2.211,7	91.5%
13	6.745,0	2.953,7	43.8%
14	7.138,4	3.829,0	53.6%
15	6.502,9	2.281,5	35.1%
16	10.247,7	6.778,2	66.0%
17	9.445,0	6.698,5	70.9%
18	3.223,8	1.893,3	58.6%
19	7.374,0	4.217,5	57.1%
20	10.126,6	6.871,5	67.6%
21	3.680,9	1.391,3	37.8%
22	4.402,6	1.879,8	42.7%
23	9.651,5	5.084,5	52.3%
24	5.452,2	3.350,8	61.1%
25	3.271,8	1.102,4	33.5%
26	2.607,2	786,8	30,2%
TOTAL	159.431,2	94.977,6	59.6%

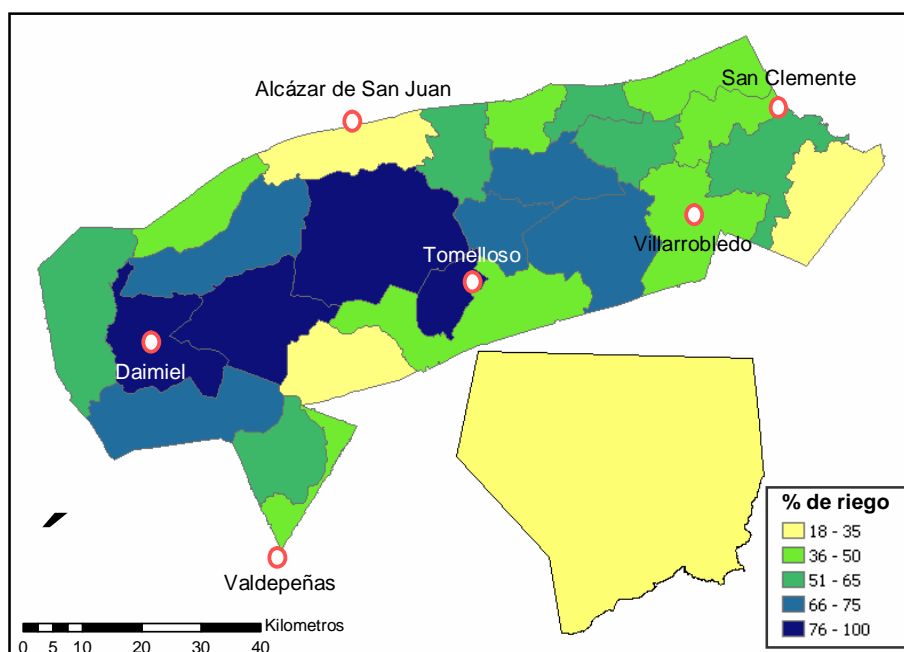


Figura 58. Distribución del porcentaje de riego en el viñedo dentro del área de estudio.

La distribución de cultivos leñosos regados frente a la distribución general de cultivos leñosos dentro de los acuíferos sobreexplotados se muestra en la Figura 59.

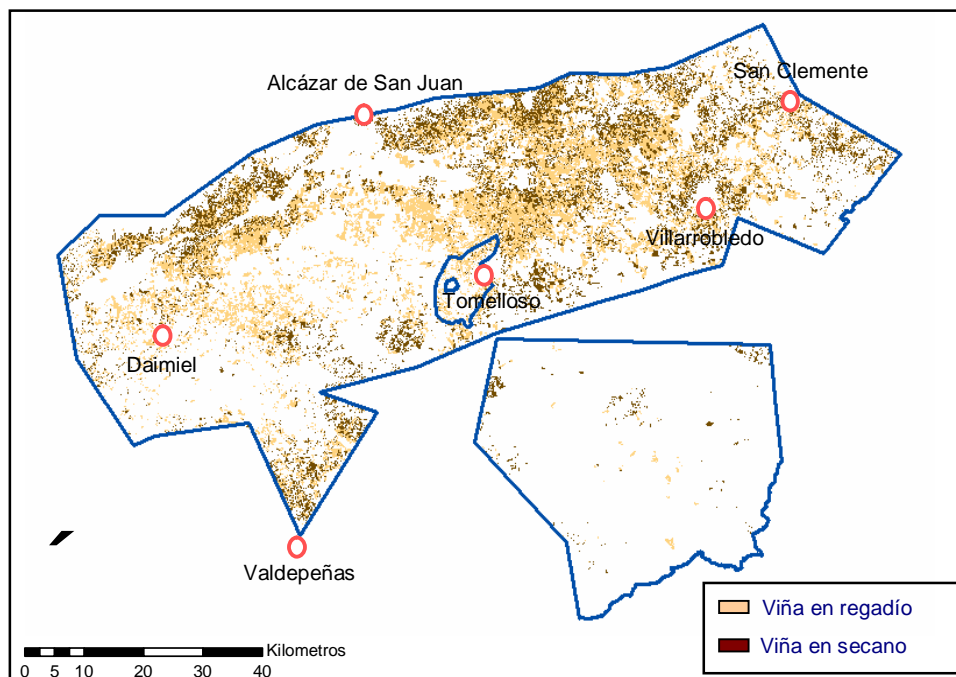


Figura 59. Distribución del viñedo en regadío dentro de la zona de estudio.

Desde el punto de vista del consumo estimado, aplicando las dotaciones unitarias de  $1.500 \text{ m}^3/\text{ha}$  y año, que establece el Plan de Ordenación de Extracciones para 2009, el consumo total estimado en la Unidad Hidrogeológica de La Mancha **Occidental** debido al riego de cultivos leñosos se estima en  $143,6 \text{ hm}^3$ , de los cuales  $141,3 \text{ hm}^3$  corresponden al viñedo. En relación al total, habría que considerar un consumo estimado de  $140,3 \text{ hm}^3$  asociado a la extracción de aguas subterráneas y de  $3,3 \text{ hm}^3$ , derivados del uso de aguas superficiales dentro de la Zona Regable de Peñarroya.

El consumo ligado a la viña en el perímetro de sobreexplotación de **Campo de Montiel** se estima en  $1,2 \text{ hm}^3$ .

Las dotaciones recomendadas por el SIAR varían considerablemente dependiendo de la zona del acuífero y resultan menores en la mayor parte de los casos que la dotación establecida por el Plan de Ordenación (ver Tabla 50). No obstante, hay que tener en cuenta que, la mayor parte de las veces, el riego de la viña no se produce con objeto de evitar la aparición de estrés en la planta, sino para maximizar la producción de uva en términos de kilogramos recogidos por hectárea. En este contexto, la impresión general es que técnicas como el riego deficitario controlado, que buscan optimizar el consumo de agua al mismo tiempo que enfocan las características de la uva hacia un fruto de mejor calidad para la elaboración de caldos, no tienen por el momento demasiado arraigo en la zona. Así, resulta coherente que las dotaciones establecidas bajo el Plan de Ordenación, y que se basan en un consenso entre observaciones de técnicos agrónomos y prácticas

declaradas por los representantes de los agricultores, resulten superiores a las recomendaciones teóricas de riego.

Tabla 50. Estimación de la dotación media SIAR para la viña en los acuíferos sobreexplotados

ZONA	ET (mm)	P (mm)	Pe (mm)	Nc (m <sup>3</sup> /ha)	Ne (m <sup>3</sup> /ha)
Villarrobledo	124,7	27,2	21,8	1.029	1.287
San Clemente	148,5	22,2	17,8	1.307	1.634
Tomelloso – Alcázar	111,6	60,8	48,6	630	787
Manzanares	113,5	41,8	33,4	801	1.001
Daimiel	115,7	38,8	31,0	847	1.058
Ruidera	133,0	30,4	24,3	1.087	1.359

NOTA: Las abreviaturas de los nombres de los campos son análogas a las expuestas en la Tabla 43.

Desde el punto de vista del consumo estimado, aplicando las recomendaciones del SIAR a las zonas más cercanas a cada estación de referencia, el consumo total para el viñedo se sitúa en 103,2 hm<sup>3</sup>, de los cuales: 100,4 hm<sup>3</sup> corresponden al riego con aguas subterráneas en la unidad de La Mancha Occidental, 1,7 hm<sup>3</sup> corresponden al riego con superficiales dentro de la zona de Peñarroya y 1,1 hm<sup>3</sup>, se refieren al riego dentro del perímetro de sobreexplotación del Campo de Montiel.

Teniendo en cuenta la variabilidad observada en campo en cuanto a la cubierta foliar de las vides y la existencia de diferentes sistemas de plantación, resulta coherente pensar que las dotaciones de viña puedan oscilar notablemente dentro de un rango amplio. Las medidas de caudalímetros y ensayos experimentales, así como los comentarios de los propios regantes, indican la coexistencia de riegos de apoyo de baja dotación para viñas en vaso con dotaciones cercanas a los 500 m<sup>3</sup>/ha y de riegos intensivos en espalderas que pueden superar ampliamente los 3.000 m<sup>3</sup>/ha y año. Entre ambas situaciones, existe un extenso abanico de posibilidades, pudiendo ser la situación estándar la considerada por el Plan de Ordenación.

Este mosaico de posibilidades se ha intentado cubrir a partir de la clasificación de las parcelas regadas en varios grupos. Esta división se ha realizado teniendo en cuenta la información auxiliar sobre el sistema de plantación y el índice de vegetación medio medido a mitad de agosto de 2009. A cada grupo se le ha asignado una dotación aproximada que, aunque no se basa en criterios objetivos, interpreta la variabilidad existente de una forma más cercana a la realidad.



Tabla 51 Consumo estimado para la viña en función de su sistema de plantación y desarrollo foliar

CATEGORÍA	Dotación aproximada (m <sup>3</sup> / ha y año)	Superficie regada (ha)	Consumo estimado (hm <sup>3</sup> )
Vaso de baja dotación	500	10.230,2	5,1
Vaso dotación media	1.317 <sup>11</sup>	51.265,7	67,5
Vaso de alta dotación	2.000	10.876,2	21,8
Espaldera de baja dotación	750	1.975,5	1,5
Espaldera dotación media	1.500	17.522,7	26,3
Espaldera de alta dotación	2.500	3.107,1	7,8
TOTAL		94.977,4	129,9

Si dividimos esta estimación por zona de aplicación y origen del recurso, el consumo de aguas subterráneas en la unidad de La Mancha Occidental sería de 125,2 hm<sup>3</sup> y en el perímetro de sobreexplotación del Campo de Montiel de 1,2 hm<sup>3</sup>, para un total de extracción de 122,7 hm<sup>3</sup>. El riego de viñedo con aguas superficiales se estima en 3,5 hm<sup>3</sup>. La dotación media anual de consumo para el viñedo se sitúa en 1.367,7 m<sup>3</sup>/ha.

## 5.2. Validación de resultados

La validación de los mapas de cultivos regados se ha llevado a cabo a partir de su comparación directa con la muestra de campo que no ha sido empleada dentro del proceso metodológico empleado.

Dentro del análisis de validación se recogen tanto los resultados numéricos asociados a la precisión alcanzada en la identificación de la presencia de riego como apreciaciones y conclusiones relacionadas con el grado de ajuste de cada proceso metodológico a las características e intensidad del riego.

El proceso se ha llevado a cabo, de forma separada, para cada una de las tres tipologías de cultivos consideradas en el desarrollo metodológico.

<sup>11</sup> Esta dotación aproximada se basa en los resultados del proyecto HAGAR – “Herramienta de autogestión para el uso sostenible del agua de riego en agricultura”, financiado por la Comisión Europea dentro de su programa LIFE-Medio Ambiente. En este proyecto se controló, durante el año 2004, la práctica habitual de riego para parcelas de viña en vaso repartidas dentro del acuífero de la Mancha Occidental, empleando controladores de riego y contadores volumétricos. La cifra de 1.317 m<sup>3</sup>/ha, representa el consumo medio estimado.

### 5.2.1. Validación del mapa de superficie regada en la primavera de 2009

Esta fase se ha centrado en el análisis del grado de acierto en la determinación de la existencia de riego en los cultivos de cereal. El proceso de validación se ha llevado a cabo a partir de datos de campo obtenidos a lo largo de la zona de estudio y que no han sido utilizados dentro del proceso de asignación de parcelas al mapa de cereal en regadío. La muestra de validación se encuentra distribuida en las seis clases existentes para caracterizar la tipología de riego/secano de acuerdo a las observaciones de campo (ver capítulo 3.2.2.i).

La comprobación del grado de acierto para la muestra se ha realizado mediante su comparación espacial con el mapa de cereal en regadío elaborado. Se ha considerado que las clases de “*riego*” y “*posible riego de apoyo con infraestructura*” deberían encontrarse incluidas en el mapa, mientras que las parcelas pertenecientes a alguna de las tres clases de secano o a la clase de “*posible riego de apoyo sin infraestructura*” no deberían formar parte del mapa de cereal en regadío.

Sin embargo, hay que indicar que esta aproximación directa para la validación debe ser sometida a una interpretación antes de realizar procesos de cuantificación de la fiabilidad o precisión del ajuste y de extraer conclusiones acerca de la bondad de los resultados.

Las dos clases de “*posible riego de apoyo*” engloban parcelas donde a pesar de la realización de hasta tres visitas dentro de su ciclo fenológico no se ha conseguido constatar la presencia/ausencia de riego. Por este motivo, en ambos grupos seguramente deben aparecer tanto parcelas que han recibido un riego de apoyo como parcelas en secano. Aquellas parcelas dotadas de infraestructura de riego van a considerarse como regadíos, ya que resulta probable que se haya podido realizar algún riego a partir de los sistemas instalados. Las parcelas sin infraestructura, a pesar de presentar en algunos casos un aspecto similar a algunos regadíos, han sido consideradas como secanos, ya que además de no observarse el material de riego en campo, en las imágenes de satélite no se ha apreciado el efecto de bandeo que produce en muchas ocasiones el uso de aspersores móviles. Esta distinción está sujeta a error, por lo que esta incertidumbre debe ser tomada en cuenta a la hora de interpretar los resultados del proceso de validación.

La fiabilidad del mapa de cereal en regadío (ver Tabla 52) se establece a partir de la cantidad de muestra de validación de cada clase de tipología riego/secano que ha sido incluida/no incluida en el mapa final de cereal en regadío.

Las categorías donde la presencia/ausencia de riego se ha determinado con mayor fiabilidad se corresponden con aquellas donde el cultivo se ha podido caracterizar con mayor seguridad a partir de las visitas de campo, lo cual cumple la lógica esperada.

Tabla 52. Resultados del proceso de validación a partir de muestra de campo.

CLASE DE CEREAL EN CAMPO	MAPA DE CEREAL EN RIEGO		Precisión estimada
	Secano (ha)	Riego (ha)	
Secano no cuidado	155,1	0,0	100,0%
Secano	168,8	3,7	97,9%
Secano cuidado	320,3	37,9	89,4%
Posible riego apoyo (sin infr.)	88,1	58,0	60,3%
Posible riego apoyo (con infr.)	95,9	482,3	83,4%
Riego	26,1	1.121,5	97,7%
Fiabilidad estimada	85,7%	94,2%	

Tanto por un lado, las categorías de “*secano*” y “*secano no cuidado*”, como por otro, la de “*riego*” han sido asignadas o no asignadas al mapa final de cereal en regadío con una precisión alta.

En la categoría de “*secano cuidado*” se ha cometido un error de comisión del 10,6%, por haberse incluido en el mapa de riego este porcentaje de superficie en relación al total de la muestra disponible para este grupo.

En la categoría de “*posible riego de apoyo*”, se observa que algo más del 40% de la muestra no dotada de infraestructura de riego se ha clasificado como riego. Aunque según el criterio adoptado, esta cifra ha de contabilizarse como error, no hay que olvidar que aunque en las visitas de campo no se haya podido corroborar la existencia de riego en este grupo de parcelas, su estado se asemeja al de muchas parcelas regadas, y una parte de este 40% podría realmente corresponderse con parcelas en riego.

De manera análoga, el error de omisión del 16,4% observado en la categoría de “*posible riego de apoyo en parcelas con infraestructura*”, puede deberse tanto a la existencia real de un error, como a la presencia entre la muestra de parcelas donde el sistema de riego instalado no ha llegado a usarse.

Aún teniendo en cuenta estos condicionantes, la fiabilidad global obtenida en el proceso de validación es satisfactoria. La fiabilidad del mapa de cereal en regadío se ha estimado en el 91,3%, representando el porcentaje de acierto obtenido en relación al total de superficie empleado en la validación.

Cuando una parcela se encuentra incluida en el mapa de superficie regada, se ha estimado una probabilidad de acierto del 94,2%. Cuando una parcela no se ha considerado como en riego, se estima que se ha acertado en el 85,7% de los casos. Este último porcentaje debe ser interpretado con cautela, teniendo en cuenta que la campaña de campo se ha centrado en zonas de alta densidad de riego, caracterizándose las explotaciones de secano a partir de una muestra muy inferior a la empleada para las explotaciones en regadío.

El nivel de incertidumbre causado por todos los factores descritos en el presente capítulo motiva que las cifras de fiabilidad en la identificación de secano y riego no deban interpretarse como estimaciones estadísticas robustas, sino como aproximaciones de la incertidumbre existente en la determinación de la existencia de riego.

Las cifras de precisión obtenidas en la identificación de los grupos de muestra de campo posibilitan la definición de un intervalo de confianza que marca los límites estimados para la cifra real de superficie regada en la zona de estudio.

Las superficies de cereal de riego intensivo y cereal regado con dotación estándar se han establecido mediante el cálculo de valores umbrales mínimos para cada zona, ajustados de acuerdo a la separación observada entre la muestra de campo de parcelas en riego y de parcelas en posible riego de apoyo. Para este tipo de parcelas puede considerarse con una alta probabilidad (97,7%), que han sido regadas durante la primavera de 2009.

Las parcelas clasificadas como riegos de apoyo, se corresponden con explotaciones que condicionadas por su historial de cultivo, han sido asignadas a la categoría de riego usando umbrales de asignación menos severos. El error cometido en la identificación del riego en estas parcelas puede equipararse al medido en la validación de las parcelas con posible riego de apoyo, estimado en un 22,2%.

Por último, la precisión media obtenida para la muestra de secano ha sido del 95,8%, lo que indica la potencial existencia de un 4,2% de la muestra de secano estimada como regadío sin serlo realmente.

El cálculo de la estimación del intervalo de confianza se resume en la Tabla 53.

Tabla 53. Elaboración de un umbral de confianza para la cifra de cereal en riego

Tipo de riego	Superficie (ha)	Error potencialmente cometido en la validación	
		Por comisión (ha)	Por omisión (ha)
Secano	110.000	4.620	
Riego de apoyo	9.582	1.025	1.571
Riego/riego intensivo	29.671		682
<b>TOTAL</b>		<b>5.645</b>	<b>2.254</b>

Considerando una situación hipotética, donde todo el error cometido se produzca por omisión en la discriminación del riego (ausencia de parcelas regadas en el mapa de cereal en regadío), así como la contraria, donde el error sea cometido únicamente por comisión (por introducción en el mapa de cereal en regadío de parcelas de secano), el intervalo potencial según el proceso de validación se sitúa entre 33.878 y 41.777 hectáreas, considerándose la máxima probabilidad dentro del intervalo para la cifra obtenida en el estudio de 39.523 hectáreas de cereal en riego.

Como complemento a este proceso, se ha realizado otro proceso de validación empleando datos inferidos a partir de las lecturas de caudalímetros proporcionadas. Para ello, se han cartografiado los cultivos de cereal incluidos dentro de las explotaciones donde se haya constatado la extracción de agua durante la primavera. Este análisis se encuentra igualmente sujeto a un cierto grado de incertidumbre, ya que la cartografía de explotaciones disponible no se encuentra ajustada a la situación real de distribución del riego y, por otro lado, la inclusión de una parcela en una explotación donde existe riego no implica necesariamente que haya sido regada.

Teniendo esta situación en cuenta, se ha analizado si estas parcelas han sido incluidas en el mapa de cultivos regados, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 54. Resultados del proceso de validación a partir de muestra de parcelas situadas en explotaciones con lectura de caudalímetro.

Superficie de cereal en explotaciones ligadas a captaciones donde se ha extraído agua en primavera	MAPA de CEREAL REGADO	
	Secano (ha)	Riego (ha)
	179,9	1.998,5

La precisión obtenida es del 91,7%, lo cual coincide tanto con el valor de la fiabilidad global como con la precisión asociada en el proceso de validación a las dos categorías consideradas como riego.

Estos datos han de ser utilizados con carácter orientativo, debido a que no se puede afirmar que todas las muestras de superficies regadas sean correctas, como consecuencia de la falta de definición concreta de las superficies ligadas a las captaciones donde se toman las medidas de consumo.

Para concluir, se ha analizado el grado de cumplimiento de una de las bases del desarrollo metodológico: el aumento de probabilidad de existencia de riego dependiendo de la existencia de rotaciones de cultivos en riego o la presencia de riego dentro de algún año de la serie histórica de datos disponibles.

Los resultados finales, divididos de acuerdo a los grupos definidos para describir el aumento de probabilidad de riego debido al historial de cultivo de cada parcela, muestran un elevado grado de cumplimiento de la acepción realizada. Se ha calculado, para cada grupo, el porcentaje de superficie clasificada como riego en relación al total de cereal cultivado. Los datos contenidos en la Tabla 55 muestran un aumento considerable de porcentaje de riego en cada uno de los grupos, según se incrementa su potencialidad para encontrarse en riego en función de la metodología diseñada.

Este aumento era predecible al haberse utilizado umbrales de asignación de riego más reducidos para los grupos que aportan una mayor connotación de existencia de riego. No obstante, las diferencias en los resultados no pueden obedecer únicamente a las

diferencias de umbrales, ya que los cambios entre grupos correlativos son en muchas ocasiones escasos, compartiendo incluso valores umbrales, en algunas ocasiones.

Tabla 55. Agrupación según el historial de riego de cada parcela de cereal en la UH 04.04

GRUPO	Superficie regada en relación al total de superficie de cereal en el grupo (%)
A	63,8%
B	49,8%
C	33,6%
D	20,8%
E	19,0%
F	9,0%

La relación existente entre la existencia de riego en una parcela, el tipo de rotación de cultivos en la que se encuentre y el tipo de actividad agrícola que ha sufrido analizado en un periodo prolongado de tiempo queda probada, lo cual fortalece el enfoque elegido durante la investigación.

### 5.2.2. Validación del mapa de superficie de cultivos herbáceos regada en verano y otoño de 2009

Con objeto de contrastar y poder cuantificar la fiabilidad y precisión de los resultados obtenidos, se llevó a cabo una campaña de campo específica durante el otoño de 2009 (ver capítulo 3.2.2.ii), en la que se visitaron parcelas no utilizadas como muestra en la elaboración del mapa de cultivos herbáceos en regadío.

El trabajo se desarrolló únicamente dentro del territorio de La Mancha Occidental, donde se concentra la superficie de herbáceos regados durante el verano, por lo que los datos y resultados expuestos en el presente capítulo se ciñen a esta unidad. También hay que indicar, que el cultivo de ajo se ha incluido en el presente apartado de validación, ya que aunque este cultivo se riegue durante el final de la primavera, la metodología seguida para su discriminación resulta análoga a la seguida para varios cultivos herbáceos regados durante el verano y difiere considerablemente de la empleada para el cereal.

La recogida de muestra se centró en los cultivos determinados a partir del proceso digital de imagen, visitándose un porcentaje significativo de la superficie clasificada.

Durante la campaña de validación no se han observado restos de la existencia de riego en parcelas fuera del mapa de cultivos. Se puede considerar que la práctica totalidad de las parcelas de herbáceos con respuesta vegetativa elevada durante el verano han quedado comprendidas dentro del mapa de cultivos regados, siendo el tamaño mínimo de la parcela discriminable, para la escala de trabajo que permite la imagen, de 0,5 ha.

Tabla 56. Superficie clasificada mediante teledetección visitada durante la campaña de validación.

Cultivos	Porcentaje de la superficie clasificada muestreada en la campaña de validación (%)
Ajo	23,00%
Alfalfa	13,48%
Cebolla	11,40%
Maíz	36,91%
Melón o Sandía	13,53%
Patata	17,49%
Pimiento o Tomate	38,35%

Por otro lado, la metodología para la discriminación de riego de herbáceos de verano ha mostrado una elevada eficacia, no apreciándose la inclusión de parcelas sin riego dentro del mapa de cultivos. Solamente se ha observado alguna confusión entre parcelas identificadas como ajo y cereales con infraestructura de riego.

El error existente en la identificación del riego en cultivos de verano resulta insignificante en términos de superficie total en regadío o en porcentaje de volumen de agua extraído de los acuíferos. Por tanto, en el caso de los cultivos herbáceos en regadío, se puede concluir que se ha detectado y cuantificado la práctica totalidad de la superficie existente.

La estimación de la fiabilidad asociada al proceso de asignación de parcelas en regadío a las categorías de la leyenda temática del mapa, se ha llevado a cabo a partir de una comparación entre un grupo de parcelas clasificadas y muestra de campo. Los resultados se presentan mediante una matriz de confusión, que relaciona la *verdad terreno* obtenida en la campaña de campo con la clasificación de cultivos herbáceos en regadío (Tabla 57). La validación del proceso de clasificación muestra que:

- La **precisión global** es del **95,3%**. Este valor representa la relación entre el número de píxeles de la muestra clasificados correctamente y el total de la muestra.
- La **media de las precisiones de las clases** es del **93,7%**. La precisión de una clase es la relación entre el número de píxeles de la muestra correctamente clasificados en esa clase y el número de píxeles totales de la muestra correspondientes a esa clase. Es un indicador inverso del error por omisión.
- La **media de las fiabilidades de las clases** es del **82,5%**. La fiabilidad de una clase es la relación entre el número de píxeles en esa clase en la muestra que se han clasificado correctamente y el número de píxeles de la muestra (pertenecientes a esa clase y al resto de clases) que se han clasificado en esa clase. Es un indicador inverso del error por comisión.

El hecho de que el parámetro de fiabilidad o precisión sea del 100% no permite afirmar que no haya posibilidad de error. Este dato permite afirmar que, dentro del porcentaje muestreado (que resulta representativo), no se han encontrado errores en el mapa de cultivos. Esto implica que la fiabilidad o precisión tiende a ser total para estos cultivos.

Tabla 57. Matriz de confusión del mapa de cultivos herbáceos en regadío.

		CAMPO								PRECISIÓN
		Ajo	Alfalfa	Cebolla	Pimiento/Tomate	Maíz	Melón/Sandía	Patata	Otros	
MAPA	Ajo	369,4							25,4	93,6%
	Alfalfa		42,2						4,4	90,7%
	Cebolla			131,2		16,2				89,0%
	Pimiento/Tomate				228,2				7,6	96,8%
	Maíz					44,8		3		93,7%
	Melón/Sandía				6,1		570,1		5,0	98,1%
	Patata	1,1				0,8		26,9		93,7%
	Otros cultivos								-	-
FIABILIDAD		99,7%	100,0%	100,0%	97,4%	72,5%	100,0%	90,0%	-	



Del análisis detallado de los resultados de la matriz de confusión, se puede concluir que:

- La identificación de ajo, realizada mediante fotointerpretación, es muy fiable, si bien se considera que pueden existir parcelas en riego que no hayan sido discriminadas.
- La posibilidad de contar con un elevado número de fechas de las imágenes, ha permitido detectar con precisión las parcelas de alfalfa, cuyo comportamiento de alternancia de siega y crecimiento rápido del cultivo resulta muy característico.
- Los resultados para el cultivo de cebolla son buenos, existiendo algunas confusiones con cultivos de similar dotación de consumo.
- Para el maíz, el resultado es aceptable aunque han existido confusiones con algunas parcelas de cebollas de recogida tardía. Esto se debe a la amplia heterogeneidad en los ciclos de cultivo de maíz que se han observado en campo, lo que influye en la representatividad de la muestra.
- El cultivo de melón y sandía es mayoritario en superficie y consumo estimado entre los cultivos de verano en la zona de estudio. Los resultados obtenidos en su detección son muy fiables. La capacidad de discriminación de este cultivo se basa en la observación de los plásticos en las imágenes de los meses de mayo y junio y en una evolución fenológica característica.
- La patata se ha discriminado por fotointerpretación con una precisión elevada.
- El pimiento, el tomate y calabacín se han agrupado en una única clase al ser plantas de la misma familia, similares en fenotipo y ciclo de desarrollo, y con dotaciones idénticas. La caracterización de parcelas ocupadas por estos cultivos se ha visto favorecida por la presencia de plásticos de color negro en las primeras fases de su desarrollo, que se ha identificado en las imágenes de primavera.
- Por último, las parcelas etiquetadas como “otros cultivos” han coincidido en la mayor parte de las ocasiones con cultivos que no pertenecían a las clases mayoritarias de la leyenda del mapa de cultivos.

Las restantes categorías del mapa de cultivos- adormidera, girasol, hortalizas de hoja, maíz tardío y remolacha- han sido completadas con parcelas observadas en campo, mientras que la categoría de riego de otoño aglutina todas la restantes parcelas donde en la imagen de septiembre se ha observado una respuesta clara de riego.

Por otro lado, se ha realizado una estimación de la fiabilidad del mapa de cultivos regados que incorpora otros factores:

- la existencia de un porcentaje muy importante de parcelas observadas durante las visitas en campo y que han sido directamente asignadas al tipo de cultivo real
- el error cometido por la inclusión de parcelas no pertenecientes a la categoría de herbáceos de verano

- la existencia de parcelas en regadío no asignadas a ninguna clase de cultivo y que por consiguiente, deben considerarse como errores dentro del proceso

La sistemática de trabajo desarrollada durante las campañas de campo de verano y otoño ha permitido la obtención de una cantidad de muestra muy significativa, superior al 59% del total de la superficie finalmente incluida en el mapa de superficie regada y ampliamente representativa para todos los cultivos principales en la Llanura Manchega.

Tabla 58. Superficie muestreada de los principales cultivos en la zona de estudio.

Cultivos	Superficie muestreada durante el verano (%)	Superficie muestreada durante el otoño (%)	Superficie total muestreada durante 2009 (%)
Ajo	46,9%	12,2%	59,1%
Alfalfa	50,8%	6,6%	57,4%
Cebolla	56,3%	5,0%	61,3%
Maíz	84,9%	5,6%	90,4%
Melón o Sandía	39,9%	8,1%	48,1%
Patata	54,8%	7,9%	62,7%
Pimiento o Tomate	55,3%	17,1%	72,5%

Este factor debe de ser tenido en cuenta, ya que la parte del mapa que ha sido clasificada mediante el proceso digital de imágenes y el empleo de técnicas de fotointerpretación, y que por tanto, queda sujeta a error es ya de entrada menor que la directamente identificada mediante visitas en campo.

Se ha realizado una estimación de la fiabilidad global del mapa de cultivos, bajo las siguientes suposiciones:

- La superficie visitada en campo se considera como correctamente identificada.
- La superficie no identificada (Otros cultivos regados) se contabiliza como error.
- Se ha estimado el error cometido por la posible inclusión de cultivos no regados en verano dentro del mapa.
- La superficie clasificada mediante teledetección se pondera mediante su fiabilidad y precisión parciales determinados para cada categoría del mapa de cultivos mediante la matriz de confusión.

**La fiabilidad global del mapa de cultivos** herbáceos de verano se ha estimado en el **96,6%**.

En la Tabla 59, se recoge el análisis por cultivo. En este caso, se ha considerado la categoría de “otros cultivos regados”, como aceptable (al ser inferior a un 1% del total de superficie clasificada) y no se ha cuantificado como error, siendo los resultados muy ajustados.

Tabla 59. Fiabilidad por cultivo del mapa de herbáceos regados en 2009

Cultivos	Superficie discriminada según método (ha)		Fiabilidad del Mapa	Precisión del Mapa
	Campo	Teledetección		
Ajo	1.891,5	1.314,5	99,88%	97,38%
Alfalfa	402,9	299,1	100,00%	96,04%
Cebolla	1.816,3	1.147,7	100,00%	95,74%
Maíz	779,6	82,4	97,37%	99,40%
Melón o Sandía	3.470,1	3.749,9	100,00%	99,01%
Patata	227,6	135,4	96,27%	97,65%
Pimiento o Tomate	1.002,1	380,9	99,28%	99,12%

Adormidera	177	
Girasol	256	
Hortaliza de verano	97	11
Maíz tardío	85	
Remolacha	16	
Riego primavera y otoño	181	
Riego de otoño	84	23
Otros cultivos regados	15	106

### 5.2.3. Validación del mapa de superficie de viña y otros leñosos regada en 2009

Del total de muestra de viñedo tomada en campo, se ha reservado una parte para la realización de una validación de los resultados obtenidos, coincidente con las visitas de campo realizadas sobre las áreas donde se han adquirido datos multispectrales de muy alta resolución espacial. Las parcelas muestreadas para la fase de validación han sido clasificadas en tres categorías (*en regadío, con posible riego, en seco*), tomándose información adicional relacionada con la edad y el estado de la planta.

La identificación de las viñas en regadío resulta la más sencilla y fiable de entre las tres categorías, al haberse apreciado los sistemas de riego instalados en campo. La práctica totalidad de los viñedos en espaldera cuentan con riego por goteo, observándose además, riego en parcelas en vaso mediante líneas de goteo, colocadas usualmente cada dos filas de viña y, en menor medida, mediante aspersión móvil.

La incidencia del riego sobre las plantas se aprecia generalmente tanto en el color y aspecto general de la vid, como en el desarrollo foliar y morfología, siendo frecuente la observación de viñas en seco que reducen su superficie foliar expuesta para limitar sus pérdidas de agua por evapotranspiración. Sin embargo, existen viñedos con goteros tendidos que sin duda habrían sido catalogados como “*en seco*” en caso de no haberse visto los tubos. Estas viñas deben recibir dotaciones reducidas de forma puntual (riegos de apoyo) y presentan en muchas ocasiones marcos de plantación mayores.

Además, durante la campaña de campo aparecen casos en los que no se observan las infraestructuras de riego a pesar de que las plantas presentan un buen aspecto, sin síntomas evidentes de estrés hídrico, y cuentan con una cubierta vegetal igual o superior a

la de las parcelas regadas en la zona. Estos casos resultan los más complicados de resolver, habiéndose realizado un análisis visual de la serie temporal de imágenes con objeto de buscar evidencias de la presencia de riego. En función de las observaciones realizadas, estas parcelas han sido reasignadas a las categorías de riego o seco.

Por último, se ha considerado la categoría de secanos, que engloba tanto las parcelas que se encuentran en seco de forma evidente como aquellas otras donde las plantas presentan un mejor estado aparente de desarrollo y falta de estrés, pero que no resulta suficiente para incluirlas en la categoría de “en posible riego”.

En la Figura 60 se recogen ejemplos gráficos de las categorías descritas con objeto de ayudar a fijar los criterios de asignación aquí descritos. Además, en la Figura 61 se muestra el efecto producido por la edad del viñedo en la fracción de cubierta vegetal sobre la parcela.

La muestra de validación ha comprendido 4.490 hectáreas repartidas dentro de 10 subzonas a lo largo de toda el área de estudio (ver Figura 10), y tomadas dentro de las zonas voladas con un sensor multiespectral a muy alta resolución espacial.

Por un lado, tenemos un grupo de zonas con porcentaje de viña en riego en torno o inferiores al 50%, formada por las áreas de Villarrobledo Centro (zona 22) y Provencio – San Clemente Sur (zona 23), situadas en la pasada del este, y por la zona de Villarrubia Norte (zona 2), situada en la pasada del oeste. Todas estas áreas se encuentran ligadas a zonas perimetrales con mayor dificultad de acceso al agua del subsuelo. En sentido contrario, encontramos la zona de Daimiel (zona 3), en la pasada del oeste, y las zonas situadas en la pasada central del vuelo que representan las mayores densidades de riego. También, se han tomado datos de zonas con características intermedias, aunque con predominio del regadío sobre el seco.

Tabla 60. Porcentaje estimado de riego de viña en las zonas de muestreo para validación

ZONAS	Nombre	% riego en mapa de viña en regadío <sup>12</sup>
Zona 2	Villarrubia N - Puerto Lapice	36,0%
Zona 22	Provencio - San Clemente N	42,7%
Zona 23	Villarrobledo	52,3%
Zona 24	San Clemente	61,1%
Zona 5	Villarrubia S – Arenas – Villarta	66,6%
Zona 17	Tomelloso - Socuéllamos O	70,9%
Zona 3	Daimiel	84,2%
Zona 11	Alcázar - Campo Criptana S	91,4%
Zona 12	Z.R. Argamasilla	91,5%

<sup>12</sup> Según la aproximación basada en el ajuste por regresión multilogística





Figura 60. Ejemplos de caracterización del viñedo en el muestreo de campo.





Figura 61. Efecto de la edad del cultivo sobre la fracción de cubierta vegetal sobre el terreno.

Las viñas jóvenes se encuentran en una fase inicial de su desarrollo cubriendo un porcentaje muy reducido del suelo sobre el que se asientan. Por este motivo, la respuesta que se recoge en los datos de observación de la Tierra sobre estas parcelas, procede casi íntegramente de radiación reflejada por el suelo, no siendo posible la discriminación de la presencia de riego.

Las viñas en vaso viejas, representan el caso contrario, tratándose de plantas con varias décadas de edad y que como se infiere del tamaño de sus cepellones cuentan con volúmenes radiculares muy amplios. Esto les permite alcanzar agua almacenada a profundidades del suelo que resultan inaccesibles para otras plantas más jóvenes. Por este motivo, este tipo de plantas pueden ser confundidas con regadíos aunque resulta común encontrarlas en seco.

El proceso de validación se ha llevado a cabo cruzando los datos recogidos en campo con el mapa de viña en riego, con objeto de tratar de responder a dos preguntas diferentes:

- **¿Cuál es el grado de acierto observado en el mapa de viña en regadío?** En esta línea se ha realizado un proceso de validación de tipo “*hard*” o de ausencia/presencia. Como resultado, se ha cuantificado el porcentaje de aciertos que se ha tenido al considerar una viña, bien en regadío, bien en secano y de manera análoga, qué porcentaje de viña vista en campo ha sido correctamente clasificada en las dos categorías de nuestro mapa.
- **¿Cuál son los motivos que explican la aparición de errores en el mapa de viña en regadío?** Para intentar responder, se ha realizado una validación “*soft*” o de ajuste del modelo, que se usa para clasificaciones que incorporen un dato de probabilidad de ocurrencia. Dado que cada parcela de viña ha sido asociada a un valor de probabilidad multicriterio de encontrarse en riego (codificado entre 0 y 100) ha sido posible realizar una validación de este tipo sobre el mapa de viña obtenido. Este proceso nos informa acerca de hasta qué punto el mapa de probabilidad multicriterio y el mapa de viña observada en campo se ajustan entre sí.

#### 5.2.3.1. Grado de acierto del mapa de viña en regadío

En la validación de la discriminación de ausencia/presencia de riego en la viña se ha realizado una comparación directa entre el valor asignado a las parcelas en el mapa de viña en regadío y el observado durante la visita de campo.

El muestreo de campo se ha completado a partir de la fotointerpretación de las imágenes adquiridas en el vuelo multispectral, lo cual ha servido para revisar los datos tomados en campo y revisar los casos catalogados como dudosos. Tras este proceso, las parcelas empleadas en la validación han sido clasificadas en dos únicas categorías: riego y secano, que resultan coincidentes con las del mapa de viña en riego de la zona de estudio.

La primera fase del proceso se ha centrado en la comparación del grado de acierto de los dos mapas de viña en regadío disponibles, generados a partir del proceso de EMC con ponderación subjetiva y del proceso de EMC con ponderación basada en el ajuste zonal por regresión multilogística.

En la Tabla 60 se muestra el porcentaje de acierto general en la identificación de riego o secano para ambos mapas, descomponiendo los datos obtenidos de acuerdo a las cuatro posibilidades existentes: de las cuales las dos primeras corresponden a aciertos y las dos últimas a los dos posibles tipos de errores:

- MS/CS (Mapa Secano / Campo Secano): En el mapa de viña la parcela aparece como secano y en campo se ha observado como secano.

- MR/CR (Mapa Regadío / Campo Regadío): En el mapa de viña la parcela aparece como regadío y en campo se ha observado como regadío.
- MS/CR (Mapa Secano / Campo Regadío): En la visita en campo para la validación, la parcela se ha apreciado en secano y en el mapa de viña se ha clasificado como secano. Se conoce como error de omisión.
- MR/CS (Mapa Regadío / Campo Secano): En la visita en campo para la validación, la parcela se ha apreciado en regadío y en el mapa de viña se ha clasificado como regadío. Se conoce como error de comisión.

Tabla 61. Porcentaje de acierto en la identificación de riego o secano en el viñado.

**a) Método EMC con ponderación por regresión multilogística**

		CAMPO		Precisión
		Riego	Secano	
MAPA	Riego	3.471,9	192,1	94,8%
	Secano	136,0	655,7	82,8%
Fiabilidad		96,2%	77,3%	

Precisión total en la identificación: **92,6%****b) Método EMC con ponderación subjetiva**

		CAMPO		Precisión
		Riego	Secano	
MAPA	Riego	3.362,3	321,0	91,3%
	Secano	231,1	583,6	71,6%
Fiabilidad		93,6%	64,5%	

Precisión total en la identificación: **87,7%**

La precisión en la identificación se calcula como el cociente entre la superficie ocupada por parcelas acertadas (parcelas clasificadas correctamente como secanos o regadíos) entre el total de superficie muestreada en el proceso de validación. En el proceso de validación la precisión en la identificación por el método de regresión multilogística (92.6%) se muestra significativamente superior a la obtenida a partir de la ponderación subjetiva (87.7%). Este resultado confirma la apuesta por una regla de decisión de tipo objetivo, ajustada a partir de datos y observaciones de campo. Por este motivo, las cuantificaciones de viña regada que se han expuesto son las correspondientes al método de evaluación multicriterio mediante un ajuste por regresión multilogística para la ponderación de los criterios de aptitud.

El porcentaje correspondiente a parcelas para las que se ha cometido un error en la asignación (7,4%) se divide según el error haya sido de comisión (por incluir en el mapa de viña regada parcelas de secano) o de omisión (por no considerar como riego parcelas en secano), existiendo un efecto de compensación entre ambos errores.



Aún teniendo en cuenta que el porcentaje de superficie muestreado para la validación no resulta significativo (se encuentra cercano al 3% del total) y que no se encuentra homogéneamente repartido por la zona de trabajo, resulta un dato útil para realizar una estimación del intervalo de confianza asociado a la cifra de viña en regadío existente en los acuíferos sobreexplotados. Este intervalo se define por los umbrales asociados a un error total producido únicamente por omisión (umbral mínimo) y por el lado contrario a un error que se explicase solamente por comisión, bajo el supuesto de ausencia de error de omisión (umbral máximo) y se sitúa entre 91.370 y 99.920 hectáreas.

La disponibilidad de una superficie representativa de muestra de campo (22%) en relación al total de viñedo, permite el empleo de técnicas estadísticas con objeto de estimar la cifra de superficie regada para la viña dentro de la zona de estudio. La estimación estadística se ha realizado a partir de un procedimiento de expansión directa de la muestra que se ha aplicado por separado para cada uno de los segmentos territoriales, equivalentes en este caso, a estratos poblacionales. El estimador de la superficie total ( $Y_h$ ) para un estrato genérico “h”, queda especificado por la siguiente expresión:

$$Y_h = (S_h/S_{mh}) * \sum_{i=1, n} (Y_{hri}) \quad \text{[Ecuación 8]}$$

donde  $S_h$  es la superficie total de viñedo que forma el estrato h

$S_{mh}$  es la superficie total de la muestra tomada dentro del estrato h

$n$  es el número total de parcelas muestreadas dentro del estrato h

$Y_{hri}$  es la superficie de las parcelas que han sido muestreadas como regadío, siendo esta superficie nula si la parcela se cultiva en seco.

Los porcentajes de riego muestreados en campo están sobreestimados debido a que la existencia de espalderas puede constatarse desde una distancia importante, mientras que en el caso de los vasos, la determinación del riego o seco necesita de una visita más en detalle. Por ello, el proceso de expansión directa se ha realizado únicamente sobre los viñedos en vaso, sumándose posteriormente la superficie determinada en espaldera al resultado estimado para los vasos.

El resultado del análisis indica que la superficie de viña en regadío debería situarse en el entorno de las 93.395 hectáreas, distribuidas en 68.672 hectáreas cultivadas en vaso y 24.723 hectáreas plantadas en espaldera. Esta cifra resulta muy próxima a la determinada a partir de la metodología expuesta en este trabajo, que cuantifica la viña en regadío dentro de los acuíferos sobreexplotados en 94.978 hectáreas. Al mismo tiempo, se sitúa dentro del intervalo de confianza estimado a partir de los datos derivados del proceso de validación.

La siguiente fase del análisis se ha dirigido al estudio de la variabilidad existente en la identificación de la presencia/ausencia de riego, dependiendo de las características de cada zona y de la densidad de riego existente. Con este objeto, se ha repetido el proceso de validación por comparación directa para cada una de las zonas consideradas.

Tabla 62. Porcentaje de acierto en la identificación de riego o secano para la viña, por zona.

ZONA	Superficie (ha)				Precisión en la identificación	% de riego en el muestreo
	MS/CS	MR/CR	MS/CR	MR/CS		
02	257,5	108,2	22,5	34,4	86,5%	33.7%
03	9,9	172,6	3,0	18,3	89,5%	93.7%
05	57,5	454,0	23,3	53,5	86,9%	86.3%
11	27,3	1.328,0	14,5	9,7	98,2%	97.0%
12	0,0	18,8	2,3	0,0	89,1%	89.1%
17	131,7	678,4	45,2	21,5	92,4%	79.8%
20	2,4	118,1	8,4	6,0	89,3%	92.0%
22	82,8	155,5	5,7	18,0	91,0%	66.2%
23	69,4	161,0	6,5	23,1	88,6%	70.8%
24	14,6	270,8	3,5	7,4	96,3%	93.9%
<b>TOTAL<sup>13</sup></b>	<b>653,1</b>	<b>3.465,4</b>	<b>134,9</b>	<b>192</b>	<b>92,6%</b>	<b>82.3%</b>

El análisis zonal de la precisión obtenida en la identificación de la presencia/ausencia de riego se muestra relativamente independiente del porcentaje de superficie de viña regada cuantificado en cada segmento territorial. Sin embargo, el porcentaje de acierto llega a resultar superior en las zonas de claro predominio del riego, lo cual resulta lógico, ya que el contraste entre riegos y secanos suele ser mayor en las zonas con abundancia de riego y caracterizadas por una mejor accesibilidad para la extracción de agua.

#### 5.2.3.2. Análisis del grado de ajuste del modelo

Dentro del total de parcelas sometidas a validación se ha realizado un análisis de detalle sobre los errores detectados en el mapa de viña en regadío, persiguiendo un doble objetivo:

- Observar en qué tipología de parcelas la metodología no ha permitido una correcta detección de la existencia de riego.
- Medir el grado de ajuste existente entre la probabilidad de existencia de riego y la tipología de errores detectados.

Los errores han sido analizados en todas aquellas parcelas donde se ha encontrado contradicción entre el mapa de viña en regadío y la muestra de validación y donde existe, al mismo tiempo, dato del vuelo multiespectral. El total de parcelas analizadas asciende a 157, extendiéndose sobre una superficie de 258,1 ha.

<sup>13</sup> La suma de superficies totales varía ligeramente en relación a la Tabla 61, debido a la ausencia de algunas parcelas incluidas en zonas con muy poca superficie de validación y, por tanto, no consideradas en el análisis.

La disponibilidad de imágenes multiespectrales de alta resolución ha permitido realizar un análisis de detalle acerca de la tipología y posible sistemática de los errores cometidos, posibilitando su agrupación en función de diferentes casuísticas. En este sentido, se ha observado que los errores existentes pueden ser explicados por las siguientes causas (ver desglose en Tabla 63):

- a) Edad de las plantaciones de viña. Los viñedos nuevos o jóvenes presentan un escaso desarrollo foliar, lo que hace que la respuesta procedente de estas parcelas, y registrada en las imágenes de satélite, sea similar o inferior a la que se recoge de parcelas en seco.
- b) Tamaño y forma de las parcelas. Se han localizado casos en los que el tamaño reducido o la forma alargada de las parcelas ha producido que los valores medios de índice de vegetación que les han sido asociados, hayan sido influidos profundamente por los valores de las zonas adyacentes. Este hecho se conoce como “efecto de borde” y es inherente al intento de obtener información a una escala mayor que la proporcionada por los datos de partida. En este caso se produce por el uso de datos procedentes de imágenes Landsat (escala de trabajo 1:150.000) para intentar delimitar parcelas catastrales (escala 1:5.000)
- c) Color y humedad del suelo. Dado que la respuesta recogida por las imágenes resulta una mezcla de la reflectancia de vegetación y suelo, las diferencias en la respuesta del suelo pueden motivar la aparición de errores en la discriminación de la presencia de riego, siendo este efecto mayor cuanto menos precisa sea la escala de trabajo.
- d) Ineficiencia de la aproximación metodológica empleada para detectar las diferencias producidas por el riego en las parcelas de viñedo. Existencia de casos límite donde resulta muy complicado discriminar la presencia de riego.

Tabla 63. Distribución de parcelas analizadas con errores en el proceso de asignación.

Tipo de causa error	Nº errores analizados
Edad	23
Tamaño / Forma	24
Color Suelo	19
Metodología	91

En las siguientes figuras, se recogen ejemplos que tratan de ilustrar, de forma gráfica, el análisis realizado.

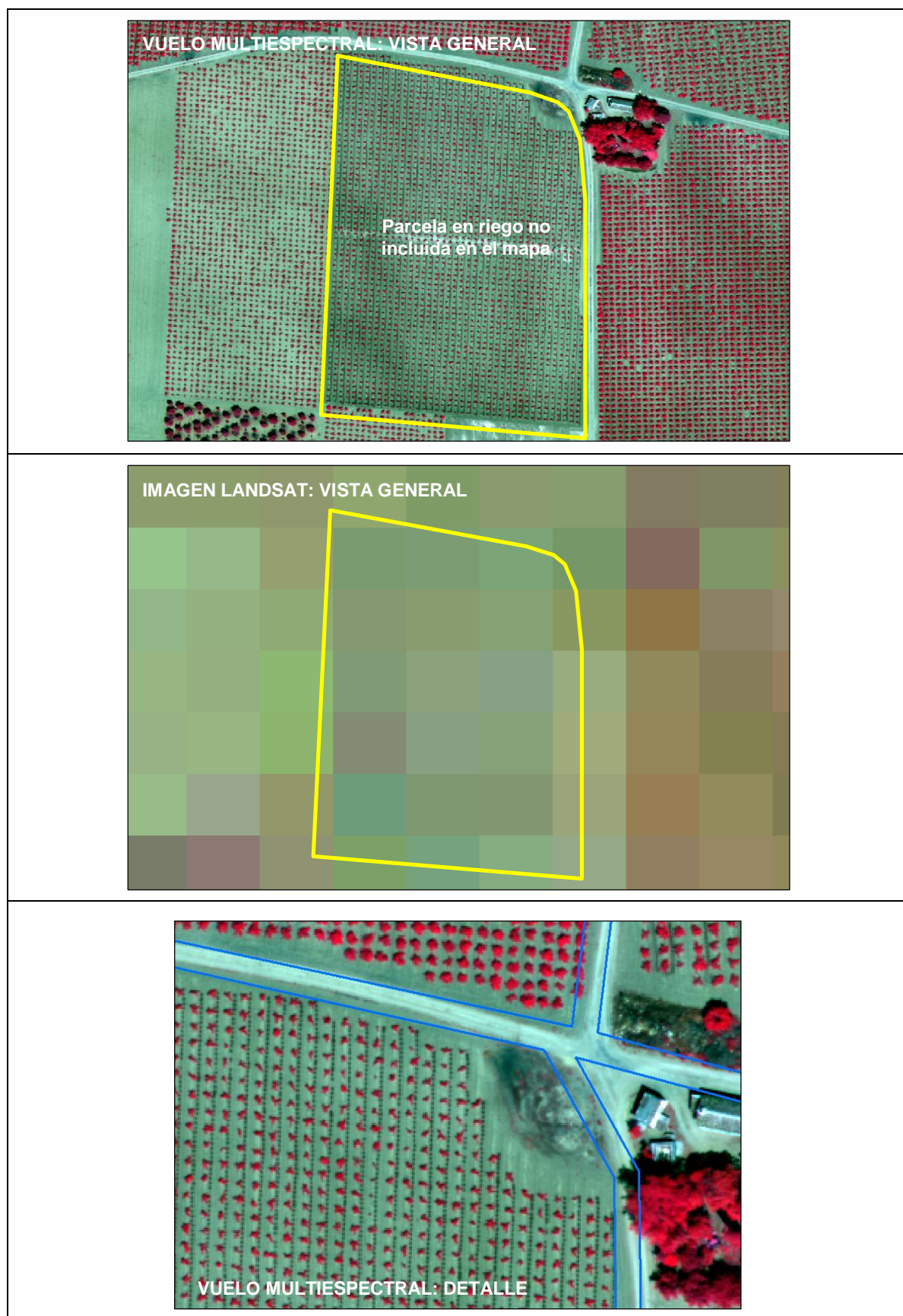


Figura 62. Tipología de los errores en el mapa de viña en regadío: Viña en vaso joven en riego.





Figura 63. Tipología de los errores en el mapa de viña en regadío: Viña en espaldera joven en riego.

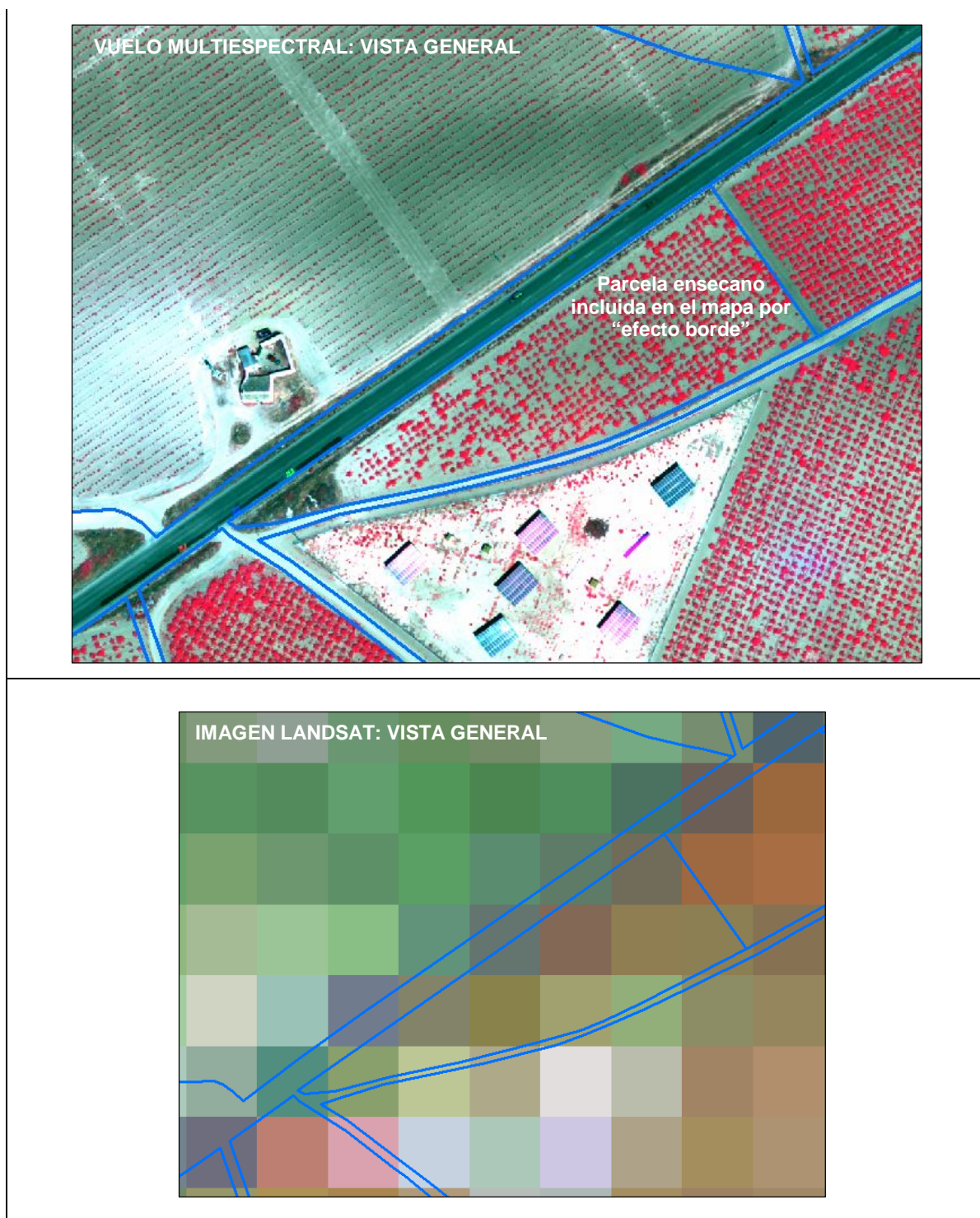


Figura 64. Tipología de los errores en el mapa de viña en regadío: Efecto de borde.



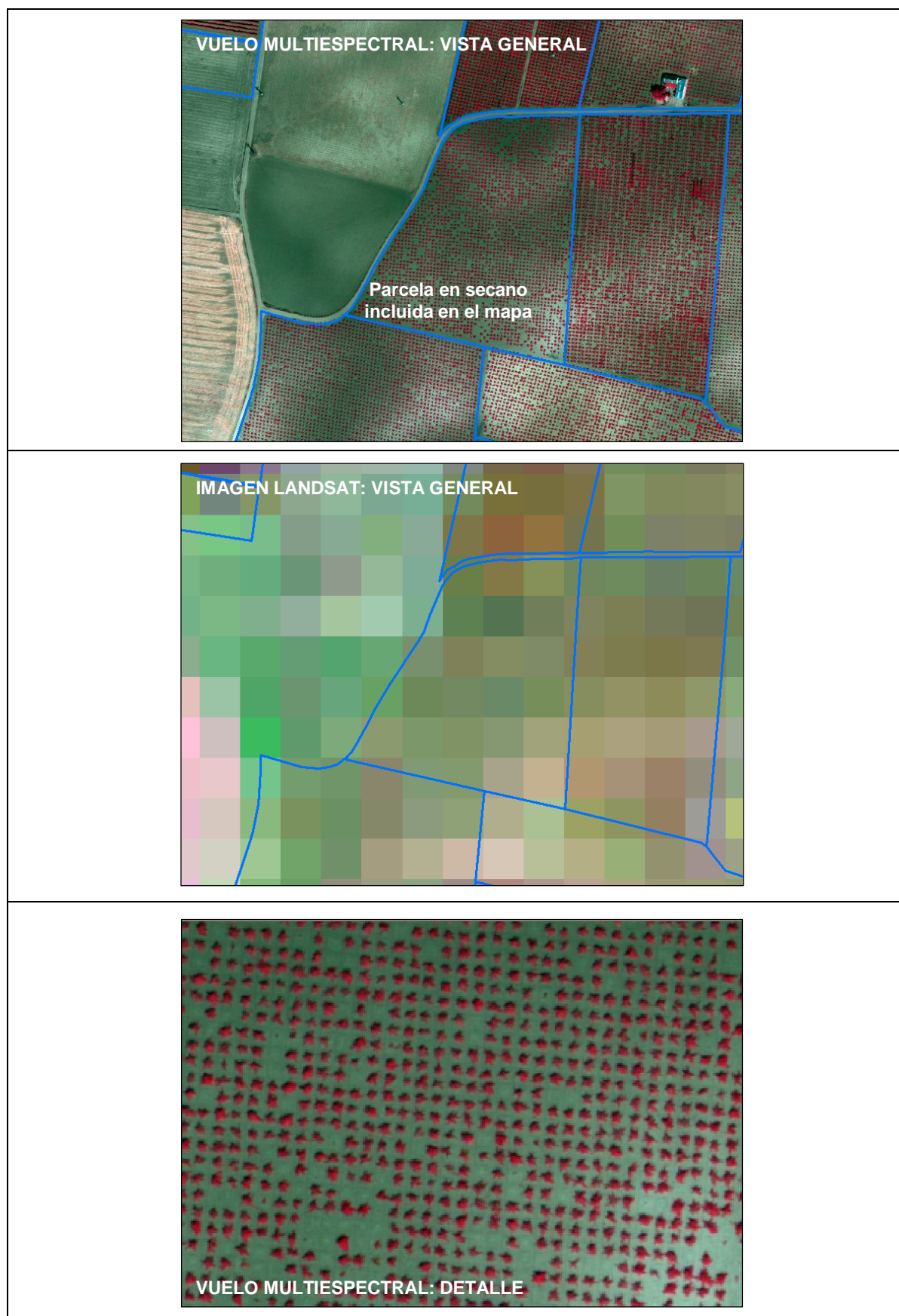


Figura 65. Tipología de los errores en el mapa de viña en regadío: Suelo con respuesta fuerte



Teniendo en cuenta la existencia de condicionantes sobre la capacidad de discriminación del riego a partir de la aproximación utilizada, se ha profundizado en la estimación del grado de ajuste del modelo.

Como primer paso, se ha procedido a la elaboración de un mapa que represente la probabilidad que tiene asociada cada parcela de encontrarse en regadío en función del análisis multicriterio realizado. Para que todas las parcelas del mapa sean comparables, se han preparado mapas de probabilidad por separado para cada una de las zonas de la segmentación, que han sido unidos posteriormente en un único mapa.

Como primer criterio, se ha determinado el rango de valores de probabilidad entre 0 y 100, asociándose el valor de 50 al umbral determinado en cada zona para considerar si una parcela se encontraba en riego o seco.

La metodología empleada no ha permitido una separación total entre las muestras de parcelas en seco y parcelas en regadío, existiendo en todos los casos una zona de probabilidad multicriterio donde se pueden encontrar tanto parcelas en seco como en regadío. Se han definido los límites aproximados de estas orlas de probabilidad, y se les han asignado los valores comprendidos entre 40 y 60. De esta forma, las parcelas con probabilidad menor que 40 no deberían confundirse con parcelas en riego, mientras que aquellas con valores mayores que 60, deberían diferenciarse de los secos. El grupo de parcelas con probabilidad acotada entre 40 y 60 debería concentrar la mayor parte de los errores que puedan detectarse. Para la selección del umbral de probabilidad 40, se ha tomado el valor que deja por debajo únicamente el 2,5% del total de superficie incluida en la muestra de viña regada en la zona. La determinación del umbral de seco, se halla de forma análoga, usando el valor que deja por encima sólo al 2,5% de la superficie incluida en la muestra de viña de seco.

El último criterio considerado ha sido la definición de los valores mínimo y máximo del mapa multicriterio a considerar en cada zona, que se han tomado asociando a los valores 0 y 100 del mapa de probabilidad los valores que marcan las colas del 1% a la derecha e izquierda del histograma de valores del mapa multicriterio para cada zona.

De esta forma, la transformación de los mapas multicriterio de cada zona a mapas de probabilidad homogeneizados se ha realizado a partir de funciones que representan 6 rectas cuya pendiente varía en función de los intervalos de probabilidad definidos y que tratan de aproximar a una función doble sigmoide (ver Figura 66). Esta función es la que representa la relación teórica entre valores obtenidos en el análisis multicriterio y la escala de probabilidad definida, basada a la existencia de una zona de incertidumbre en torno al valor umbral. Teniendo en cuenta este criterio, la relación entre probabilidad y valores multicriterio no puede considerarse de tipo lineal, ya que el número relativo de parcelas en situación de incertidumbre debería resultar mayor que el de las parcelas situadas en zonas donde la probabilidad de error se reduce considerablemente, ya que la separabilidad entre parcelas de riego y seco no es exacta.

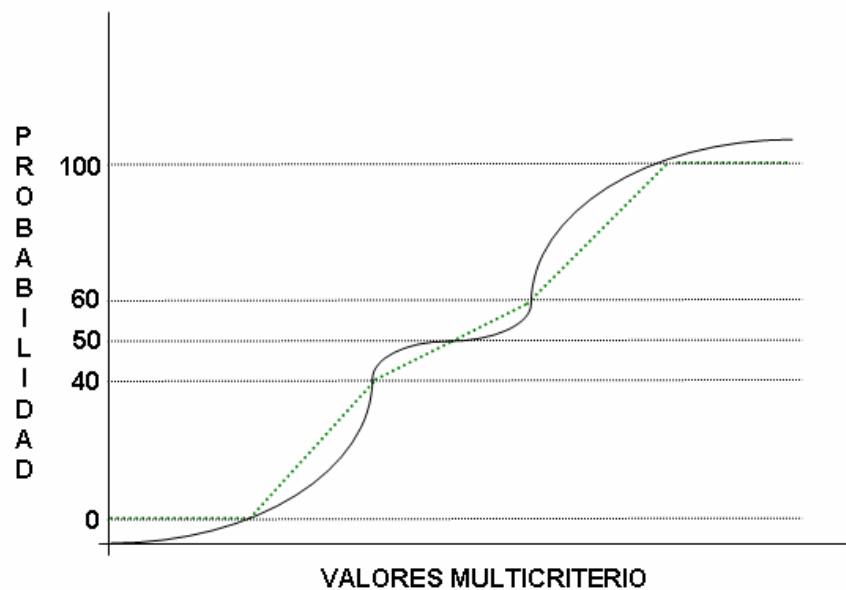


Figura 66. Relación teórica entre valores multicriterio y escala de probabilidad propuesta. En color verde se dibujan las líneas empleadas para realizar la transformación de valores.

Como resultado se ha obtenido un mapa de probabilidad de existencia de riego donde cada parcela queda cuantificada en una escala que oscila entre el 0 y el 100.

La capacidad que presenta el riego para causar diferencias apreciables en el estado y características de la planta se encuentra sujeta a varios factores y puede resultar limitada especialmente, si las dotaciones empleadas son reducidas.

En este sentido, hay que incidir que las diferencias que pueden producir variables como la edad, variedad de viña, tipo de suelo, prácticas agrícolas o marco de plantación pueden ser superiores a las ocasionadas por el efecto del riego, lo cual debería ser la principal fuente de error de la metodología.

El análisis de errores, tomando en consideración el valor de probabilidad estimado y la tipología de las causas, proporciona información directa acerca del grado de ajuste a la realidad del proceso de modelado llevado a cabo. Un ajuste adecuado se produciría en el caso de que el número de errores detectados poco esperables (aquellos localizados en parcelas con probabilidad menor que 40 o mayor que 60) sea mínimo y donde la mayor parte de esta clase de errores se justifique por causas que no dependan de la metodología empleada al no poder ser consideradas dentro del proceso de modelización.

Los resultados obtenidos en el análisis del ajuste del modelo en función de la probabilidad observada en las parcelas contempladas en el proceso de validación se resumen en la Tabla 64.

Tabla 64. Probabilidad de riego en las parcelas de validación, según el modelo.

Intervalo	Número de parcelas		Porcentaje acierto	Porcentaje de parcelas en el intervalo
	Secano	Riego		
< 20	146	20	88,0%	9,5%
20 – 39	215	23	90,3%	13,7%
40 – 45	87	21	80,6%	6,2%
46 – 54	124	159	66,7%	16,2%
55 – 60	22	180	89,1%	11,6%
61 – 80	43	461	91,5%	28,9%
> 80	7	236	97,1%	13,9%
TOTAL	644	1100	87,3%	100,0%

La interpretación inicial de estos datos indica un ajuste evidente entre la probabilidad prevista para cada parcela y el grado de acierto, de forma que los errores se concentran en la zona próxima al umbral elegido para definir la separación entre parcelas regadas y parcelas en secano. En los restantes intervalos, se observa un aumento del grado de acierto según la probabilidad se aleja del umbral.

Este fenómeno se observa tanto si los intervalos crecen o decrecen en valores probabilísticos, con la única excepción del intervalo con probabilidad inferior a 20, que presenta un porcentaje de acierto inferior al intervalo anterior. El análisis detallado de la tipología de los errores cometidos en cada intervalo de probabilidad permite comprender esta situación. En el caso de los errores asociados a parcelas con valores estimados de probabilidad de riego muy reducidos, se ha comprobado que de 9 parcelas en esa situación, 8 corresponden a plantaciones jóvenes, que aún no se encuentran en producción, mientras que el otro caso es un vaso en goteo en el que se aprecia un desarrollo de cubierta foliar muy reducido. En todos los casos, estas parcelas presentan valores de índice de vegetación muy bajos, lo que ha motivado que se les asigne valores mínimos de probabilidad.

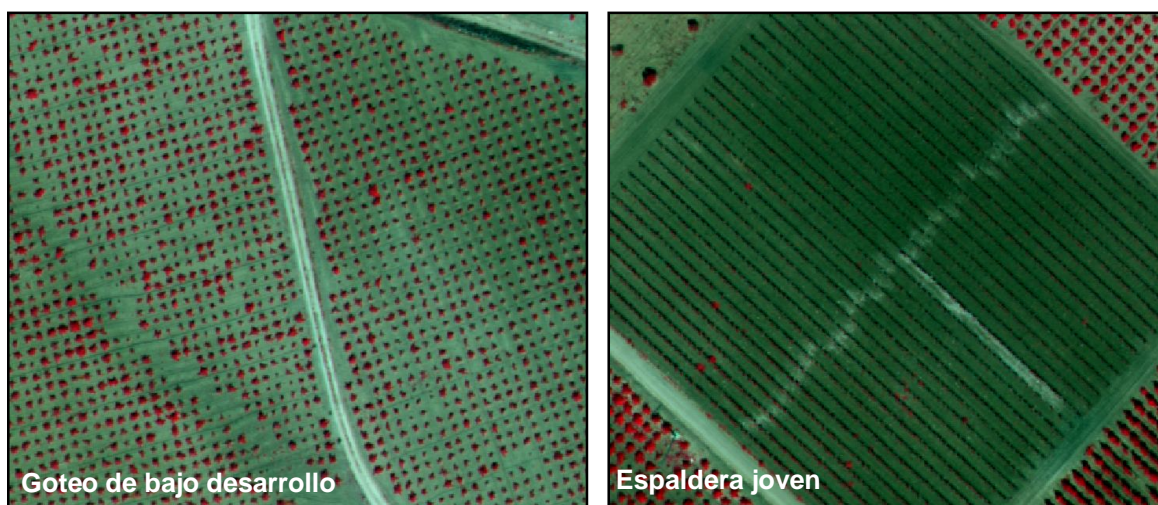


Figura 67. Ejemplos de errores en el intervalo de muy baja probabilidad de riego

Este caso muestra la afección sobre la metodología propuesta por parte de un conjunto de factores no contemplados en el proceso y que no pueden ser controlados a partir de los datos disponibles. Empleando los datos procedentes del análisis de fotointerpretación se ha estimado la causa de los errores en los diferentes intervalos de probabilidad (ver Tabla 65). Se comprueba que los errores directamente imputables al modelo, siguen presentando un patrón de ajuste muy claro en relación al mapa de probabilidad, agudizándose su concentración en torno al valor umbral situado en el valor de probabilidad de 50.

Tabla 65. Probabilidad de riego según el modelo en las parcelas de validación

Intervalo	Causa de error (número de parcelas)			
	Edad	Efecto borde	Suelo	Ajuste de la metodología
< 20	8			1
20 – 39	7	1		9
40 – 45	5			16
46 – 54	3	9	6	34
55 – 60		6	4	11
61 – 80		8	7	17
> 80			2	3
TOTAL	23	24	19	91

Los errores agrupados en la categoría de “ajuste de la metodología” comprenden un conjunto de parcelas donde la presencia/ausencia de riego se ha discriminado erróneamente debido a que los criterios elegidos no han servido para determinar su estado. En esta categoría genérica se incluyen, tanto viñedos en secano con alta cubierta foliar, como viña regada de poco desarrollo, junto a parcelas regadas sin que existiese ningún indicio previo, o parcelas con un historial propicio para la existencia de riego que han sido cultivados en secano.

Como ejemplo gráfico, se presenta el caso de una parcela con riego de apoyo mediante goteo móvil, que ha sido clasificada como riego con una probabilidad de 51, lo cual implica que su valor de evaluación multicriterio ha coincidido prácticamente con el umbral elegido para la determinación de la existencia de riego. Tanto en la imagen de muy alta resolución como en la imagen Landsat, se observa como a pesar de la presencia de riego, el desarrollo foliar de las plantas no resulta demasiado elevado. En este caso, el acierto en la discriminación del riego no deja de ser anecdótico, ya que esta parcela o parcelas con características similares podrían haber sido clasificadas como secanos con una ligera variación del umbral o de alguna de sus características. No obstante, no deja de ser una señal de un buen ajuste del modelo usado, ya que es capaz de identificar las parcelas que se comportan de forma intermedia entre regadíos y secanos en la zona límite de discriminación del riego.



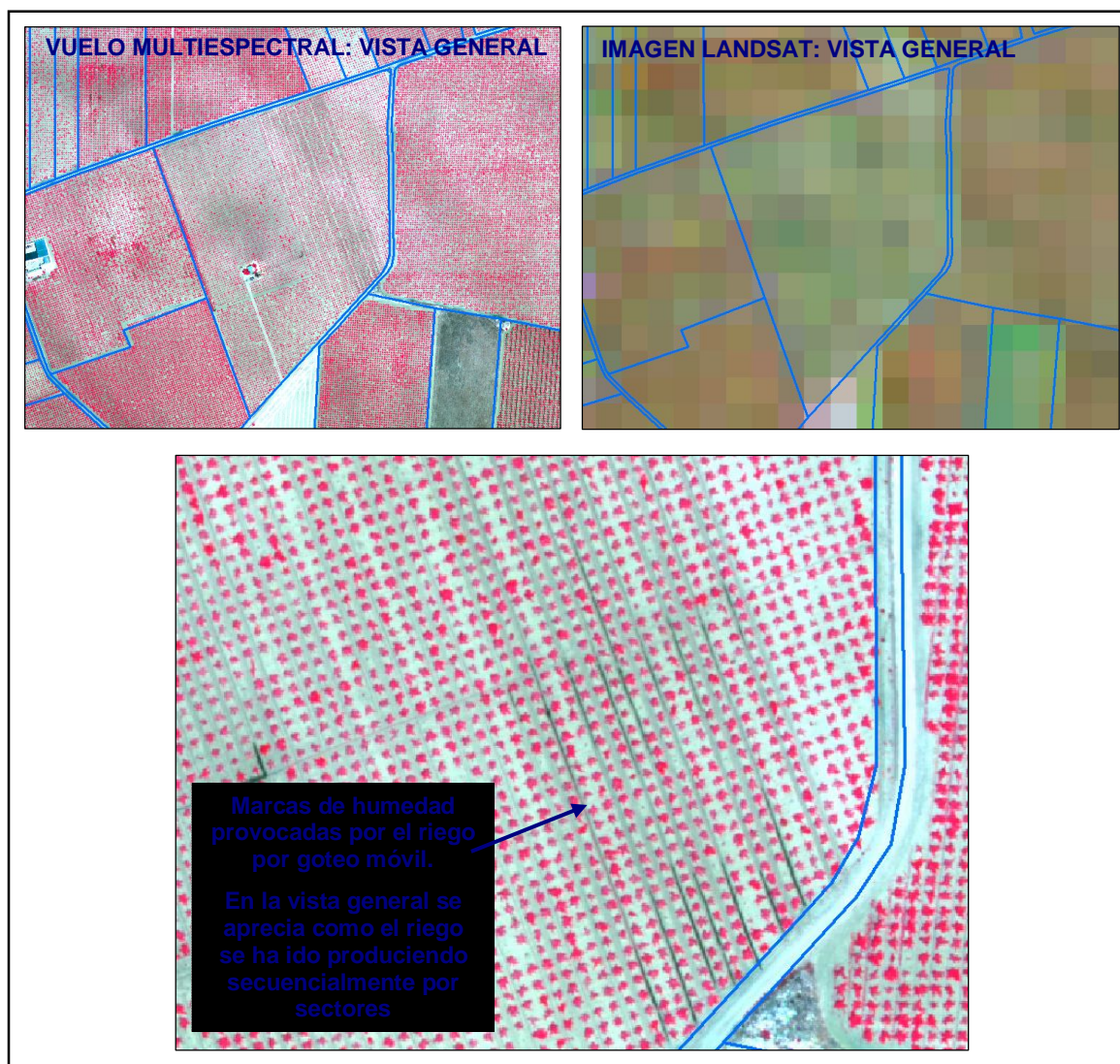


Figura 68. Ejemplo de viña con riego de apoyo con probabilidad de riego situada en la zona de entorno del umbral de decisión de asignación de la categoría de riego

El análisis del grado de ajuste del modelo resulta complementario al análisis del grado de acierto en la identificación del riego en la viña. La información adicional que aporta se centra en la estimación de la capacidad general que tiene el modelo para apreciar la presencia/ausencia de riego y caracterizar los efectos que esta práctica tiene sobre el cultivo.

La distribución de los errores en función de la probabilidad estimada muestra la existencia de una zona de mayor incertidumbre, donde se concentran la mayor parte de las equivocaciones detectadas en el proceso de validación. En las zonas de mayor o menor probabilidad la precisión de identificación del riego aumenta progresivamente, siendo gran parte de los errores observados consecuencia de factores que no han podido ser tenidos en cuenta dentro de la aproximación metodológica planteada.

### 5.2.3.3. *Análisis de sensibilidad del proceso de evaluación multicriterio*

Como complemento a los restantes procesos de validación, se introduce un análisis de sensibilidad del modelo desarrollado. Esta aproximación se centra en el estudio de la estabilidad del desarrollo metodológico y se realiza, generalmente, a partir del examen de las variaciones producidas en los resultados obtenidos al variar uno o varios de los criterios o variables de ajuste empleadas.

Este tipo de ensayos tiene como fin la mejora del modelo, al aportar información acerca de su vulnerabilidad ante la variación de los parámetros empleados en su diseño y construcción (Gómez y Barredo, 2005).

En relación al presente estudio, basado en un método multicriterio ajustado mediante una regresión multilogística, se ha considerado conveniente analizar la sensibilidad del modelo ante variaciones en la variable dependiente (muestra de campo), y en las variables independientes (mapas de aptitud). En este último caso, la disponibilidad del vuelo multiespectral ha permitido analizar la variación potencial en los resultados asociada al empleo de una fuente de datos de mayor resolución para la elaboración del mapa de índice de vegetación. Esto resulta de especial interés, ya que este mapa constituye el criterio con mayor peso relativo dentro del análisis.

La disponibilidad de las imágenes del vuelo ha permitido además profundizar en otros dos aspectos de interés:

- El grado de exactitud de los datos de campo
- La posible mejora en los resultados que podría conseguirse al trabajar con datos de muy alta resolución espacial.

Dado que los datos de campo se toman a pie de parcela, se está asumiendo la inexistencia de errores relacionados con la discriminación de la presencia de riego en la muestra de campo. Esto no resulta cierto, ya que existen numerosos factores que pueden ser causa de error en la toma de datos, relacionados tanto con el error humano (en posicionamiento de parcelas, entrada de datos,...) como con la dificultad de detección de las infraestructuras de riego (aspersores móviles, riegos puntuales, riegos concentrados en una semana,...).

Con objeto de conocer cual es la incertidumbre asociada a los datos tomados en campo se ha cotejado la muestra de campo con los resultados de un proceso de fotointerpretación del vuelo multiespectral sobre todas las parcelas muestreadas para la fase de validación. Así, se ha podido observar la coherencia entre ambas aproximaciones mediante la comparación de la caracterización de las parcelas en campo por ambos métodos (ver Tabla 66). Este análisis conlleva una lectura de fondo que aumenta su interés, ya que ante el aumento en la disponibilidad de sensores y plataformas (incluyendo las no tripuladas),

los datos aéreos de muy alta resolución se están postulando como una alternativa a la realización de trabajos específicos de campo.

Tabla 66. Comparación entre los datos de campo y los obtenidos mediante fotointerpretación.

		CAMPO	
		Riego	Secano
Fotointerpretación	Riego	704 parcelas (2.659,2 ha)	36 parcelas (73,1 ha)
	Secano	58 parcelas (122,6 ha)	358 parcelas (529,5 ha)

El grupo de mayor interés para el examen de la calidad de la muestra de campo es el formado por las parcelas clasificadas en campo como secano pero asignadas en la fotointerpretación como regadío. Este tipo de parcelas constituyen el error asociado a la toma de datos de campo, que afecta a un 3,1% de las parcelas y a un 2,2% del total de superficie muestreada. Dentro de las 36 parcelas clasificadas en este grupo, en 8 casos la confusión proviene de una recogida incorrecta de los datos, habiéndose asociado las observaciones de campo a parcelas que no se correspondían con la adecuada. El resto de errores se han producido por no haberse observado el riego en la visita de campo, a pesar de que en las imágenes del vuelo se aprecia su existencia (ver Figura 69).

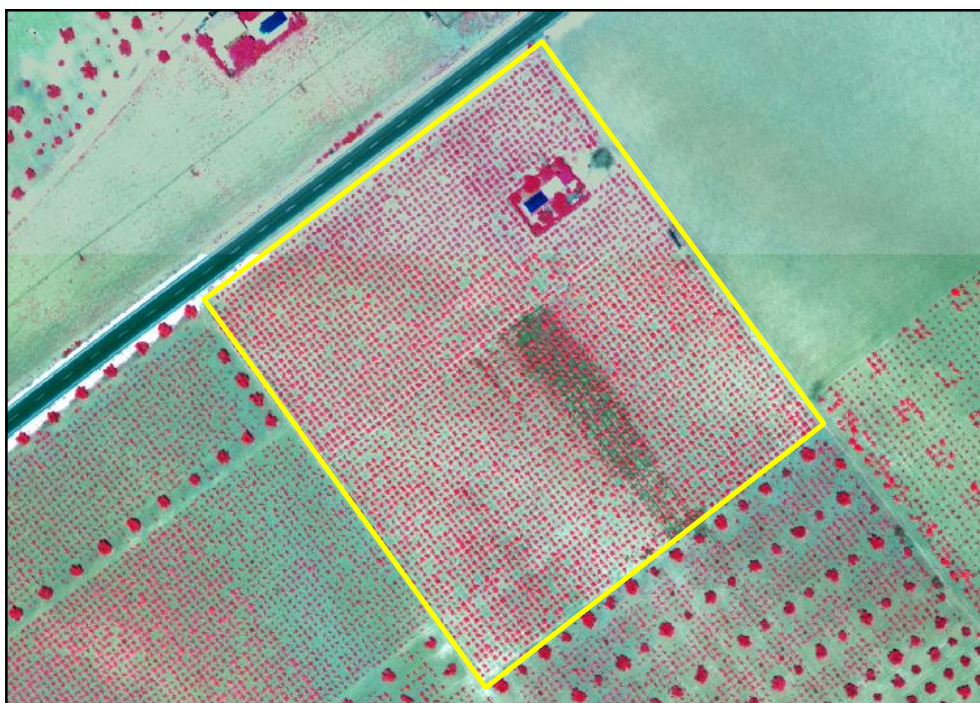


Figura 69. Ejemplo de parcela incorrectamente identificada en campo.

En la imagen se puede observar la existencia de un riego de apoyo con aspersores, que parece que se está produciendo por franjas. La parcela se observó desde la carretera, situada justo al lado contrario de donde se estaba produciendo el riego. El desarrollo de las plantas no fue considerado suficiente como para catalogar la parcela como “en posible riego”, por lo que se produjo un error en la toma de datos de campo.



Las 58 parcelas identificadas en campo como regadío pero asignadas en la fotointerpretación como secano se relacionan con parcelas en las que no se puede observar ningún indicio de riego en las imágenes del vuelo, si bien en 19 de ellas se aprecia una mayor respuesta frente a las identificadas como secano, que podría ser indicio de un posible riego de apoyo puntual. En este caso no se puede hablar de error en la muestra de campo, ya que a pie de parcela se observó la presencia de elementos de riego, a pesar de que este hecho no se haya podido corroborar a partir de las imágenes multiespectrales.

Dentro del conjunto de la superficie analizada, se ha observado un mayor número de errores en la zona de Daimiel, lo cual resulta coherente con las prácticas de riego de la zona, ya que el riego por aspersión representa un porcentaje del total muy superior al que pueda darse en cualquier otra zona del acuífero. Así, en Daimiel (zona 3), este sistema ha sido utilizado para regar el 20% del total de superficie de viñedo en riego muestreada, mientras que para el conjunto del acuífero este porcentaje no alcanza el 5%.

Este condicionante se apoya, además, en los resultados preliminares que se obtuvieron para el año 2008, en donde la zona de Daimiel mostró los resultados de acierto más reducidos de todas las zonas donde se produce un elevado porcentaje de riego en el viñedo. La revisión de los datos de campo mostraba varias parcelas catalogadas como secanos en las que, además de observarse indicios de potencial presencia de riego (existencia de pozo, cultivo en años previos de herbáceos de verano,...), se apreciaba una respuesta espectral alta en la imagen SPOT del año 2008.

Por ello, durante el año 2009, se realizó una revisión de los datos de campo recogidos en la zona, volviendo a visitar con mayor detenimiento las parcelas donde se observó mayor discrepancia entre la apreciación de campo y los criterios de existencia de riego disponibles. La revisita de estas parcelas sirvió para confirmar las sospechas existentes y corroborar la existencia de riego en muchas de ellas. Queda patente que el riego mediante aspersión móvil, (o también mediante goteo móvil, aunque esto resulta menos frecuente), dificulta la correcta recogida de datos en campo, lo cual queda acentuado por la geomorfología de la zona de Daimiel, mucho más ondulada que el resto del acuífero. En muchos casos, los tubos de aspersión se recogen después del riego o se mueven a zonas donde no son vistos durante la visita de campo, introduciendo una fuente de error en la toma de datos de campo.

La disponibilidad de una primera muestra de campo y de una muestra revisada ha permitido analizar la sensibilidad del modelo ante cambios en la variable dependiente. La falta de correspondencia entre la muestra de campo y la realidad existente, que se trata de caracterizar a partir de un modelo simplificado, resulta, sin duda, un factor de error muy a tener en cuenta.

Con objeto de evaluar el resultado obtenido a partir de ambas muestras se ha lanzado el proceso de ajuste por regresión multilogística para los dos casos. En la Tabla 67, se

recogen las características de la muestra original y de la muestra revisada, junto a los parámetros de ajuste característicos del proceso.

Tabla 67. Características de las muestras de campo usadas en el análisis de sensibilidad

	Superficie (ha)		Porcentaje de riego (%)	Parámetros de ajuste EMC	
	Secano	Riego		Pseudo $r^2$	ROC
Muestra original	248,5	974,0	79,7	0,058	0,6739
Muestra revisada	132,8	1.013,7	88,4	0,270	0,8703

Las diferencias observadas en los parámetros de ajuste resultan sustanciales, existiendo una clara correlación entre la mayor verosimilitud de la muestra de campo con la realidad y el aumento de capacidad explicativa del modelo. Esta situación se plasma en una mejora de los resultados obtenidos en la validación de los mapas de viña regada elaborados a partir de ambas muestras de campo. En la Tabla 68, se recoge el análisis del grado de acierto observado.

Tabla 68. Porcentaje de acierto en la identificación de riego para mapas elaborados a partir de diferentes muestras de campo.

**a) Método EMC a partir de muestra de campo original**

		CAMPO		
		Riego	Secano	
MAPA	Riego	159,5	18,3	Precisión 89,7%
	Secano	16,1	9,9	38,1%
Fiabilidad		90,8%	35,1%	

Precisión total en la identificación: **83,1%**

**b) Método EMC a partir de muestra de campo revisada**

		CAMPO		
		Riego	Secano	
MAPA	Riego	172,6	18,3	Precisión 90,4%
	Secano	3,0	9,9	76,7%
Fiabilidad		98,3%	35,1%	

Precisión total en la identificación: **89,5%**

La precisión en la identificación resulta muy similar en ambos casos, a partir de lo cual se podría concluir que el método resulta robusto ante una variación considerable de la distribución de las características de la muestra de campo. En este caso, una variación del 8.7% en el total de riego identificado en campo lleva a una variación del 6,4% en el grado de acierto.

Aunque el tamaño muestral empleado resulta significativo (la superficie utilizada para la validación representa un 4,7%) del total de viña plantada en la zona, la observación de los errores de forma individual introduce bastante incertidumbre en el análisis.

En el caso de la identificación incorrecta de secanos observados en campo, las parcelas mal asignadas son las mismas, correspondientes a explotaciones muy próximas a la Laguna de Navaseca y donde aparentemente la elevada humedad del suelo, causado por su carácter arcilloso y las filtraciones desde el humedal, ha favorecido un desarrollo elevado de la vegetación sin la existencia de riego. En el caso de la falta de identificación de riego, el número de errores resulta superior en el mapa desarrollado a partir de la muestra original, si bien el tamaño reducido de las explotaciones donde se producen, maquilla el resultado global.

Teniendo esto en cuenta, los resultados obtenidos en esta primera fase del análisis de sensibilidad no pueden ser considerados robustos y deben ser interpretados con cautela, ya que resulta probable que si la muestra de validación se hubiese tomado en otro sector dentro del ámbito de la zona de Daimiel, las diferencias apreciadas hubiesen sido mayores.

No obstante, el método aplicado resulta sensible ante errores cometidos en la toma de la muestra de campo, que constituye un dato crítico para su correcto funcionamiento.

Por otro lado, el análisis de sensibilidad se ha tratado de extender a los criterios introducidos como variables independientes dentro del ajuste de regresión. Para ello, se ha analizado cual habría sido la potencial fiabilidad del mapa que habría podido elaborarse sustituyendo las imágenes de satélite empleadas por una imagen multiespectral de muy alta resolución.

Bajo esta hipótesis, se ha supuesto que todos los aciertos conseguidos a través de la metodología empleada habrían sido correctamente identificados a partir de una imagen de mucho mayor resolución, por lo que el análisis se ha centrado en determinar cuantos de los errores habrían podido evitarse.

De las 62 parcelas identificadas en campo como regadas pero que en el mapa de viña se clasifican como secano, las 23 espalderas nuevas o jóvenes podrían haber sido identificadas como riegos al realizar procesos de fotointerpretación, pero nunca a través del cálculo de índices de vegetación. Además, un total de 5 errores se han producido por efecto de borde, al encontrarse las parcelas junto a suelos desnudos que han influido notablemente en la respuesta medida en el índice de vegetación. Para las restantes 34 parcelas no se ha observado ningún factor externo como causa directa del error.

Para este último conjunto de parcelas, se han calculado mapas de índice de vegetación, extrayendo la respuesta procedente de las plantas a partir de un proceso digital para la localización de máximos locales combinado con la aplicación de umbrales para la eliminación del suelo y las sombras. El análisis de los valores medios de índice de

vegetación ha permitido identificar un conjunto de parcelas que presentan una respuesta muy elevada, propia de la presencia de riego y que no han sido discriminadas correctamente a través del ajuste EMC.

Además, los procesos de fotointerpretación permiten identificar visualmente la presencia de riego en parcelas discriminadas como secano.

Así, del total de 34 parcelas analizadas, 19 podrían haber sido identificadas con fiabilidad mediante fotointerpretación o proceso digital de la imagen, quedando 15 parcelas en situación de incertidumbre.

Por otro lado, los errores totales correspondientes a parcelas discriminadas como riegos pero para las que no se ha encontrado ninguna evidencia de riego, ni en campo ni sobre la imagen de muy alta resolución, son 95. De este total, se considera que entre parcelas incluidas por efecto de borde, por respuesta de suelo y aquellas donde se miden desarrollos reducidos de la vegetación, podrían evitarse un conjunto de 44 errores.

Para poder conocer el efecto sobre las restantes parcelas sería necesario poder lanzar el proceso sobre el conjunto de alguna de las zonas, sustituyendo los mapas de NDVI procedentes de las imágenes de satélite por un mapa extraído del vuelo multiespectral, lo cual no es posible, ya que no cubre por completo ninguna de las zonas de trabajo.

En resumen, se ha apreciado que de un total de 157 parcelas discriminadas incorrectamente, el empleo de un vuelo multiespectral de alta resolución podría haber evitado 91 errores, que representan más del 53% de la superficie con confusión en la definición de la presencia/ausencia de riego. En este contexto, la fiabilidad en la identificación del riego superaría el umbral del 95%, no pudiéndose conocer si sería posible afinar más la aproximación mediante la sustitución del dato de observación espacial.

Este cálculo podría ser extrapolable al total de la superficie del acuífero, si bien la aplicación de una metodología de este tipo requeriría la adquisición y tratamiento de un gran volumen de datos y supondría un aumento significativo de los costes económicos.

## 6. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

La presente Tesis Doctoral aborda un aspecto clave dentro de la compleja situación hídrica que se ha gestado y desarrollado en las últimas tres décadas dentro de la Cuenca Alta del Guadiana. La gestión de los recursos hídricos de la zona ha seguido un patrón no sustentable en el tiempo, caracterizado además, por la degradación de numerosos ecosistemas de alto valor ambiental y la generación de un ambiente de conflictividad social.

La disponibilidad anual de recursos subterráneos es limitada y ha sido ampliamente sobrepasada, lo que ha originado un proceso de vaciado del acuífero de La Mancha Occidental. La implantación de políticas centradas en el control de la demanda es compleja y difícil de llevar a la práctica, por lo que de momento, no han conseguido los objetivos perseguidos.

Todo este proceso ha sido coincidente en el tiempo con un cambio general en la visión de la planificación y gestión hidrológica, plasmada en último grado en la aprobación del Plan Espacial del Alto Guadiana, al amparo de los criterios introducidos por la Directiva Marco del Agua. No obstante, este cambio no ha tenido un origen endógeno ya que la vocación del territorio no parece haber cambiado y el modelo socioeconómico sigue teniendo en la agricultura en regadío su pilar principal.

En este contexto, la disponibilidad de información fiable y ajustada debe ser la base, tanto para conseguir una mayor implantación y apoyo a las políticas de control de la demanda y desarrollo sostenible en la zona, como para diseñar y controlar la efectividad y grado de cumplimiento de dichas políticas.

El conocimiento de la distribución de superficie regada para cada tipo de cultivo permite estimar los volúmenes de extracción y aproximar la demanda hídrica real producida por los cultivos regados con aguas subterráneas. Este tipo de información debe constituir la base para establecer el marco de partida en procesos de discusión o negociación, así como para la toma de decisiones directas relacionadas con la planificación o el control del uso de los recursos.

La metodología desarrollada ha dado especial importancia al componente operativo, enfocándose en la generación de información de calidad contrastada sobre la totalidad del ámbito de estudio y bajo restricciones críticas como el coste económico o el plazo de ejecución. Este componente ha condicionado tanto el tipo de datos empleados como la metodología desarrollada. Los resultados podrían mejorarse partiendo desde datos de Observación de la Tierra de mayor resolución espacial o espectral que permitirían metodologías diferentes, pero su coste de adquisición superaría ampliamente al de la metodología planteada, sin que los beneficios que los gestores pueden extraer de la información suministrada aumentasen en la misma medida.

Las imágenes de alta resolución (de 10 a 60 metros de resolución espacial) se han posicionado como la alternativa más extendida para acometer estudios de cuantificación de superficies regadas en el ámbito regional (GEO, 2007), por lo que el enfoque propuesto se basa, en gran parte, en el uso de este tipo de datos.

La vigencia del problema que afronta este trabajo ha obligado a adoptar una actitud pragmática en ciertos aspectos, sacrificándose una mayor profundización en la investigación de las posibilidades de la técnica, en favor de la optimización de una aproximación más cercana a las necesidades de información y posibilidades reales de gestores y usuarios.

Todo este contexto, debe ser tenido en cuenta a la hora de analizar las conclusiones que se presentan, que se agrupan en tres categorías, según se dirigen a: la metodología desarrollada, los resultados obtenidos o al potencial de integración de las técnicas y herramientas presentadas dentro de los procesos de toma de decisiones relacionados con la gestión hídrica del territorio.

## **6.1. Sobre la metodología**

El uso de imágenes de satélite para la estimación de usos del suelo en un territorio se encuentra cada vez más extendido y admite un mayor número de aplicaciones. Así, las imágenes se emplean para extraer de forma directa la información, en muchos casos, usando como apoyo datos de campo, y también como complemento de metodologías de corte estadístico o como apoyo a trabajos de muestreo o de estimación indirecta. A pesar de que la mayor disponibilidad de imágenes y la mejora en los medios de tratamiento digital de los datos han mejorado notablemente la relación coste-eficiencia para la aplicación operativa de la teledetección, aún son muchas las administraciones que no han incorporado esta técnica para la producción de cartografía y estadísticas agrarias (Gallego, 2004).

Esta situación se debe a la falta de metodologías de trabajo suficientemente contrastadas y ajustadas a la situación y características de cada territorio.

La metodología de trabajo propuesta integra datos derivados del proceso digital de imágenes de satélite, datos tomados en campo de forma sincrónica a la adquisición de datos espaciales y datos auxiliares de diversa índole, y se ha diseñado de forma expresa con objeto de reflejar y adaptarse a la realidad agronómica, evolución reciente y condiciones actuales del territorio.

Los procesos de segmentación componen una de las bases principales sobre la que se sustenta el desarrollo y aplicación de la metodología:

- como paso previo al diseño de la metodología, se ha realizado una segmentación de cultivos, sobre la que se han definido diferentes grupos según calendario fenológico, fisonomía, representatividad y características generales.
- Como paso previo a la ejecución de la metodología, se han llevado a cabo procesos de segmentación territorial para cada grupo de cultivos, definiendo unidades territoriales para la realización de los procesos de extracción de información temática.

La generación del mapa de cultivos regados dentro del ámbito de estudio se ha conseguido a partir de la ejecución sucesiva de tres aproximaciones metodológicas, enfocadas a la discriminación de la presencia de riego en cultivos herbáceos de verano, cultivos herbáceos de primavera y viñedo. Cada una de estas aproximaciones se adapta a las peculiaridades de cada tipología de cultivo, resultando diferente de las demás, aunque compartiendo una misma base genérica.

La elaboración del mapa de cultivos herbáceos regados durante el verano de 2009, es la aproximación metodológica que se basa de forma más directa en la aplicación de técnicas de *teledetección*, apoyándose en un *trabajo intensivo de campo*.

Se han utilizado imágenes del satélite Landsat adquiridas durante el verano, además de imágenes de apoyo tomadas durante la primavera, que han servido para completar el análisis del ciclo de los cultivos. Se ha comprobado que los datos adquiridos en épocas que no resultan coincidentes con los periodos de máximo desarrollo fenológico de los cultivos pueden llegar a aportar información clave para su identificación. En estas imágenes la escasa presencia de la vegetación (en fase de nascencia o desarrollo incipiente) impide la extracción de información relacionada de forma directa con sus características. Sin embargo, la existencia de prácticas agrícolas propias en este periodo, como el empleo de diferentes tipos de plásticos o el riego para el encharcamiento del terreno, aportan información de interés.

La secuencia de trabajo se ha dividido en dos fases. En primer lugar, se ha procedido a determinar la superficie ocupada por cultivos herbáceos regados durante el verano, delimitando las diferentes unidades de cultivo presentes. Posteriormente se ha asignado cada una de estas unidades a una de las categorías de la leyenda previamente definida.

La determinación del riego y asignación a una categoría temática de tipo de cultivo se ha realizado mediante la aplicación de dos técnicas complementarias: la **clasificación multispectral y multitemporal** de imágenes de satélite en zonas de vegetación regada y la **fotointerpretación asistida** sobre series temporales de composiciones en color infrarrojo cubriendo todas las fases fenológicas del cultivo. Los resultados obtenidos mediante ambas técnicas han sido integrados a partir de un árbol jerárquico de decisión.

Las metodologías generalmente empleadas para la elaboración de mapas de cultivos se basan en la clasificación directa de los datos adquiridos por los satélites, realizando



asignaciones a nivel de píxel de la imagen o en algún caso considerando relaciones entre píxeles adyacentes para determinar agrupaciones. La metodología propuesta no se aleja de este esquema, si bien presenta varias singularidades claves para un mejor ajuste de los resultados:

- El empleo de técnicas de fotointerpretación asistida y el uso de imágenes de primavera para la identificación de cultivos. Los procesos de fotointerpretación, efectuados sobre conjuntos limitados de parcelas, han proporcionado resultados fiables para varios de los cultivos más representativos en la zona y han demostrado ser una alternativa operativa.
- La definición previa de unidades de cultivo, entendidas como áreas donde las prácticas y fenología del cultivo se mantienen constantes a lo largo de su ciclo de desarrollo. La disponibilidad de esta información permite establecer estas unidades como base para la toma de decisión asociada a la identificación del cultivo presente.
- La integración de los datos extraídos de las imágenes de satélite con los límites gráficos de las parcelas del catastro de rústica permite una mejora en la calidad gráfica del mapa final. Mediante este proceso se ha conseguido mejorar la escala de trabajo del mapa de cultivos regados desde un 1:150.000 (escala de trabajo de Landsat) a un 1:5.000 (escala catastral).

La aproximación orientada a la detección del riego de primavera ha seguido un enfoque general similar. La metodología ha partido de un trabajo previo para la determinación de parcelas cultivadas durante la primavera, que ha permitido que la decisión acerca de si una parcela se encuentra o no en riego, se haya tomado considerando la parcela catastral como unidad. Este hecho posibilita una aproximación más realista a las prácticas agrícolas existentes sobre el territorio, interpretando la parcela catastral como unidad de gestión por parte de los regantes.

Los cultivos de leguminosas para forraje han sido localizados basándose en su elevada actividad fotosintética durante su fase final de crecimiento y en su diferencia de cubierta vegetal sobre el terreno entre las primeras fechas de la primavera y su final de ciclo. El cultivo del ajo se ha identificado mediante fotointerpretación asistida.

Para el caso del cereal, cultivo mayoritario durante la primavera dentro de la Cuenca Alta, se ha diseñado una metodología basado en el uso de índices de vegetación y humedad integrados en un árbol jerárquico de decisión. En este proceso se ha tenido en cuenta la existencia de rotaciones de cultivo típicas de explotaciones de riego o secano, así como el historial de riego acaecido en cada parcela en el periodo 1984-2008. En todos los casos, los procesos se han realizado independientemente para cada una de las zonas resultantes de la segmentación del territorio.

Las diferencias entre especies y variedades de cereal cultivado junto a la variabilidad en las dotaciones empleadas, dificultan considerablemente la determinación de la presencia de riego a partir del empleo de técnicas de teledetección. En este sentido, se ha comprobado la existencia de una zona de incertidumbre donde la respuesta observada en las imágenes de satélite procedente de cultivos en secano, bien cuidados y asentados sobre suelos fértiles, llega a ser superior que la registrada en cultivos regados próximos, en los que las cantidades aplicadas seguramente no han sido demasiado elevadas.

Así, con objeto de complementar los datos proporcionados por índices de vegetación y de humedad del cultivo se han determinado para cada parcela las rotaciones de cultivo existentes en los ciclos de años anteriores y la evolución de usos agrícolas a lo largo de un periodo amplio. La consideración de ambos factores aporta una valiosa información adicional para la caracterización de las parcelas y la definición de la probabilidad de existencia de riego en cada caso.

La integración de índices extraídos de imágenes de satélite y de criterios de caracterización de las parcelas cultivadas de cereal resulta el componente de mayor originalidad e innovación de la metodología. Mientras los índices proporcionan información relacionada con las características del cultivo durante el año en curso, los criterios de rotación de cultivos y evolución histórica marcan la capacidad de acogida esperable de cada parcela en relación a la potencial presencia de riego.

La relación existente entre la existencia de riego en una parcela, el tipo de rotación de cultivos en la que se encuentre y la evolución del tipo de actividad agrícola que se ha producido durante un periodo prolongado de tiempo ha quedado confirmada por el análisis de los resultados obtenidos, lo cual fortalece el enfoque elegido.

Por último, se ha abordado el caso de los cultivos leñosos regados, cuya discriminación a partir de métodos tradicionales se muestra como la más compleja. Ante estos antecedentes y dada la importancia de este cultivo en la zona, la elaboración de un mapa fiable de distribución de la viña regada se convierte en uno de los objetivos clave de la investigación.

La viña es un cultivo complicado de analizar mediante técnicas de teledetección debido a la existencia de una respuesta mezcla de vegetación y suelo en los datos captados por el satélite, a la diversidad de prácticas de cultivo y a las propias características fisonómicas de la vid.

La clasificación de las parcelas de viña en las categorías de “*en regadío*” y “*en secano*” se ha realizado siguiendo una metodología de evaluación multicriterio (EMC). Como fases previas a la aplicación de esta metodología, se ha:

- elaborado un mapa de distribución del viñedo, actualizado al año 2009 y

- llevado a cabo una zonificación con objeto de reducir la heterogeneidad observada durante la campaña de campo en relación a las prácticas agrícolas, densidad de cultivo e intensificación agraria de los viñedos dentro del ámbito de estudio.

El procedimiento de evaluación multicriterio sigue varias fases consecutivas, sobre las que se construye el desarrollo metodológico del proceso:

- i) **Selección de criterios:** los criterios representan factores de aptitud o restricciones aplicables a la totalidad de las parcelas de viña sobre el territorio y que se relacionan directamente con la probabilidad de existencia de riego. Se han generado varios mapas para ser empleados en el proceso de evaluación, que comprenden datos de índice de vegetación medio por parcela, extraídos de imágenes adquiridas en el mes de agosto así como de la diferencia entre fechas de máximo crecimiento del cultivo y fechas previas a la brotación, de cambios producidos en el uso del suelo en un periodo amplio, de relación con varias referencias de existencia de riego, y de probabilidad de existencia de riego calculada mediante un proceso similar para el año 2008.

Para todos los casos se ha comprobado que la capacidad explicativa de estos criterios es robusta, de lo que se ha podido concluir que todos son válidos para su introducción en el modelo.

- ii) **Cuantificación y normalización de los criterios:** varios de los criterios considerados son cualitativos, por lo que sus categorías deben ser asignadas a valores numéricos con objeto de permitir su combinación con los restantes criterios. Para la primera fase del análisis, correspondiente al año 2008, el proceso de transformación de valores se ha basado en valoraciones subjetivas, de acuerdo a la práctica habitual en los procesos de EMC. La posterior revisión de los resultados obtenidos ha mostrado que la valoración de los criterios no se correspondía con aquella que optimizaría el grado de ajuste de los criterios con la presencia de riego. La ponderación subjetiva resulta una opción aceptable e incluso la única posible en muchos estudios, pero el análisis efectuado muestra que, siempre que exista la opción, resulta preferible basar la transformación de las variables cualitativas en mediciones objetivas y ajustes con base matemática. Así, la segunda fase del análisis, realizada para el año 2009, ha empleado la transformación que habría resultado más ajustada para el año anterior.
- iii) **Ponderación de los criterios:** la determinación de la importancia relativa de los criterios se realiza a través de una regla de decisión. Los ensayos realizados han determinado, que el algoritmo de regresión multilogística es el que mejor se adapta a la solución del caso, de entre varias opciones planteadas. Los ensayos han servido igualmente para definir los criterios que aparentemente permiten la obtención de resultados de mayor fiabilidad, así como para realizar ajustes

metodológicos. En este último sentido, se ha probado que se obtiene un mejor resultado cuando el proceso se lanza únicamente sobre las parcelas en vaso que no muestren valores muy elevados de índice de vegetación. Ya que tanto las viñas en espaldera como aquellas con muy elevada cubierta vegetal se encuentran necesariamente en riego, el ajuste entre criterios resulta mejor si se excluyen este tipo de parcelas cuando se tiene un conocimiento previo de su existencia.

- iv) **Determinación de riego:** el ajuste por regresión no es capaz de explicar totalmente las diferencias existentes entre parcelas de viña en riego y seco, por lo que ambas poblaciones no se encuentran totalmente separadas en términos de probabilidad EMC. Bajo esta coyuntura, resulta necesario definir un umbral de probabilidad por encima del cual las viñas se consideren regadas, de forma que se minimice el error cometido. Se han probado hasta cuatro métodos diferentes para la selección del umbral, observándose que los resultados obtenidos son muy similares en la mayor parte de los casos. El método empírico se ha mostrado como el más ajustado, si bien, dado su carácter subjetivo se recomienda seleccionar el umbral a partir de un compromiso entre los resultados alcanzados a partir de los distintos métodos propuestos.

La integración de los tres procesos metodológicos se ha realizado a partir de la unión de los mapas obtenidos de cada aproximación. La calidad geométrica de los tres mapas ha permitido la ejecución de este paso de una forma rigurosa.

El análisis realizado muestra como la inclusión de un mayor número de años en el proceso metodológico ayuda a una mejora en los resultados. El desarrollo de metodologías multianuales, permite caracterizar de forma más precisa el dinamismo de los procesos que se producen en el territorio y aporta información adicional para la asignación de la presencia de riego.

La tendencia general dentro de los trabajos de teledetección apunta al empleo de algoritmos de proceso digital cada vez más complejos y automatizados, así como al uso de datos de muy alta resolución espacial o espectral como base para la extracción de información. El presente trabajo de investigación, defiende la tesis de que el conocimiento territorial y la integración de datos procedentes de fuentes diversas son fundamentales para la realización de estudios de cuantificación de superficies en regadío. En esta investigación se trata de remarcar la necesidad y posibilidad de adaptación de los procesos metodológicos a las realidades y condiciones territoriales.

La realización de campañas de campo dirigidas ha sido un elemento clave dentro del proceso, consiguiendo un objetivo múltiple más allá de la mera recogida de datos para el entrenamiento de algoritmos de clasificación y decisión. La observación directa y continuada de las características de los cultivos y de su evolución temporal han permitido

la introducción de numerosos ajustes y mejoras dentro del proceso metodológico, ayudando además, a su mejor comprensión.

Así, la conclusión final en relación a la metodología empleada se sintetiza en la defensa del componente territorial en el diseño, planificación y ejecución de los procesos metodológicos ligados a la extracción de información temática, particularmente cuando esta información presenta un fuerte dinamismo y variabilidad. En esta línea, los procesos de segmentación y la definición de criterios territoriales basados en datos multispectrales y multitemporales conforman el esqueleto de esta aproximación.

El desarrollo metodológico se realiza a través de un procedimiento de análisis territorial, cuyo componente geográfico, se establece a partir de varios puntos diferentes:

- los datos de partida utilizados,
- el conocimiento generado acerca de la distribución de variables dentro del ámbito de estudio,
- la aplicación de tecnología de información geográfica como base para la extracción de información,
- la demostración de la importancia del conocimiento territorial para el diseño y desarrollo de la metodología propuesta y
- el empleo de mapas como resultados del proceso, lo cual permite su integración con otros datos georreferenciados.

## 6.2. Sobre la cuantificación de superficies regadas

Las conclusiones referidas a las cifras obtenidas en la estimación de la superficie regada se agrupan en dos apartados, según se refieran directamente a los datos aportados por la investigación o a su puesta en relación con otros datos disponibles para años anteriores.

### 6.2.1. Sobre la cuantificación de superficie regada en el año 2009

La cifra de **superficie regada**, durante el año 2009 dentro de los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana, se ha estimado en **157.015 hectáreas**. La práctica totalidad se sitúa dentro de la unidad hidrogeológica de La Mancha Occidental con 152.205 hectáreas, de las cuales 148.893 hectáreas corresponden a superficie regada a partir de extracciones de aguas subterráneas, mientras que el resto, 3.312 hectáreas, a superficie atendida con aguas superficiales dentro del perímetro de la Zona Regable de Peñarroya.

Atendiendo a la tipología de los cultivos regados, un 61,4% corresponde a cultivos leñosos (96.510 ha), mientras que la superficie restante se reparte entre herbáceos

regados en primavera, con un 29,1% (45.656 ha) y herbáceos regados a lo largo del verano y otoño, con un 9,5%, correspondiente a 14.849 hectáreas.

Dentro del perímetro de sobreexplotación del acuífero del Campo de Montiel, la densidad de superficie regada resulta muy inferior, con una superficie total de 4.810 hectáreas, correspondiente en su mayoría (76,5%) a cultivos regados durante la primavera.

En la Tabla 69, se recoge un resumen de la cuantificación del mapa de cultivos regados, distinguiendo según la unidad hidrogeológica en la que se produce el riego y también de acuerdo al origen (subterráneo o superficial) del agua empleada para el riego.

El predominio de los cultivos leñosos, representados casi en exclusiva por el viñedo, resulta evidente, siendo el riego de herbáceos de primavera ampliamente superior al de cultivos de verano de alta dotación, que son el tipo de cultivo que ha mostrado una mayor reducción en superficie en relación al periodo de máximas extracciones en los acuíferos.

Tabla 69. Cuantificación de superficie regada en los acuíferos sobreexplotados en el año 2009

ZONA (*)	TIPO DE CULTIVO REGADO (ha)		
	Herbáceo primavera	Herbáceo verano	Leñosos
UH 0404 – AS	41.939	13.443	93.511
Z.R. de Peñarroya	0	1.100	2.212
Total UH 0404	41.939	14.543	95.723
PS 0406	3.717	306	787
TOTAL AcSE	45.656	14.849	96.510

(\*) UH0404 – AS, significa riego con Aguas Subterráneas en la unidad hidrogeológica de La Mancha Occidental (UH0404), mientras que PS0406 se refiere al perímetro de sobreexplotación de la unidad del Campo de Montiel. Por último AcSE, es la abreviatura de Acuíferos sobreexplotados

La **estimación de consumo por riego** agrícola en el año 2009 dentro de los acuíferos sobreexplotados del ámbito de la Cuenca Alta del Guadiana ha sido de **301,0 hm<sup>3</sup>**. Esta estimación se ha realizado a partir de la selección de escenarios entre varias alternativas elaboradas para cada tipología de cultivo y unidad hidrogeológica, y queda sujeta a una elevada incertidumbre. El escenario de consumo mínimo entre todos los posibles se sitúa en 246,6 hm<sup>3</sup>, mientras que el máximo llega a los 385,1 hm<sup>3</sup>. No obstante, los casos extremos se consideran poco probables, según se argumenta en el capítulo de descripción de resultados.

Así, la cifra estimada se considera como la de mayor probabilidad dentro de un intervalo que contiene a la cifra real. Esta cifra sólo podría conocerse con certeza en caso de disponer de aparatos precisos de lectura en todas y cada una de las captaciones, lo cual resulta inviable en la actualidad. El establecimiento de una red amplia y representativa de

caudalímetros y sensores volumétricos de medición de agua de riego permitiría sin duda un mejor ajuste de la estimación frente a la realidad de las extracciones.

La climatología resulta además un factor que influye directamente sobre las extracciones. El año 2009 se ha caracterizado por una primavera con precipitaciones reducidas, con una media de 64,3 mm para el periodo entre el marzo y mayo, en el que se produce el riego. Esta cifra se muestra muy alejada de años excepcionalmente húmedos como 2004 y 2007 (con 250,8 y 200,9 mm) aunque resulta superior a la correspondiente a años caracterizados por la sequía como 2005 (41,2 mm). A pesar de lo reducido de los aportes naturales, los datos de lecturas de caudalímetros disponibles esbozan un menor consumo para el riego de primavera que el determinado por el Plan de Ordenación, por lo que el dato de consumo para primavera podría estar sobreestimado.

El verano de 2009 se caracterizó por un fuerte estiaje, con precipitaciones mínimas y elevadas temperaturas, por lo que en este caso, las dotaciones podrían encontrarse mejor ajustadas.

Dentro del acuífero de La Mancha Occidental, el consumo se estima en 291,6 hm<sup>3</sup>, de los cuales 281,4 hm<sup>3</sup> tendrían su origen en extracciones a través de captaciones de aguas subterráneas y 10,2 hm<sup>3</sup> provienen de aportes realizados desde el embalse de Peñarroya. Dentro del perímetro de sobreexplotación de la unidad hidrogeológica del Campo de Montiel, las extracciones estimadas son de 9,4 hm<sup>3</sup>.

En relación al porcentaje de consumo, los cultivos leñosos son los más significativos, suponiendo un 43,9% del total. El riego de herbáceos de verano consume un 29,1% de los recursos empleados, mientras que el 27,0% restante se asocia al riego de cultivos herbáceos durante la primavera.

Todos los procedimientos desarrollados han sido sometidos a controles estrictos de calidad, desde la adquisición de los datos hasta la obtención de resultados. La validación de los mapas finales se ha llevado a cabo de forma independiente para cada una de las tres categorías de cultivos consideradas en el estudio.

El mapa de herbáceos de verano regados ha sido revisado mediante un proceso de validación basado en el contraste con información de campo recopilada en una campaña específica.

El proceso de validación del mapa de resultados muestra que la metodología empleada permite determinar la presencia de riego con mucha exactitud. De manera general, se considera que prácticamente los únicos errores cometidos se han producido en la detección de parcelas de tamaño muy reducido (inferior a 0,5 ha), poco habituales en la zona y que en su conjunto, suman una superficie muy poco significativa en relación al total del riego. En el proceso de revisión de errores no se ha apreciado la inclusión de parcelas sin riego dentro del mapa de cultivos herbáceos de verano.



Por otro lado, se ha evaluado el grado de acierto en la identificación de los cultivos de porte herbáceo regados a lo largo del verano y otoño. La precisión global del proceso de clasificación de cultivos se ha determinado en el **95,3%**, lo que muestra que la metodología empleada ha permitido una correcta asignación de los cultivos a las categorías de interés. Teniendo en cuenta que durante la visita de campo se ha visitado un porcentaje muy elevado (cercano al 60%) del total de superficie regada, la fiabilidad global del mapa de cultivos ha sido muy elevada, estimándose en el **96,6%**.

Así, se puede concluir que el error existente en la identificación del riego en cultivos de verano resulta insignificante en términos de superficie total en regadío o en porcentaje de volumen de agua extraído de los acuíferos.

Además, hay que tener en cuenta que los errores cometidos se producen, en muchas ocasiones, entre cultivos con dotaciones teóricas de consumo muy similares, lo que a efectos prácticos limita aún más la incidencia de la incertidumbre asociada al proceso de cuantificación de superficies regadas.

La validación del mapa de herbáceos regados en primavera se ha centrado en el cereal, por tratarse del cultivo predominante en la zona. El proceso se encuentra, en cierta forma, limitado a causa de la incertidumbre asociada a la toma de datos en campo. Durante las visitas sucesivas realizadas existen un conjunto de parcelas para las cuales no se ha podido constatar ni la presencia ni la ausencia de riego. Estas parcelas se corresponden con dos casuísticas opuestas:

- a) parcelas donde no se ha observado infraestructura de riego pero en las que tanto el aspecto como las medidas tomadas en el cultivo indican un mayor desarrollo y densidad del cultivo, comparable al de explotaciones regadas y
- b) parcelas con infraestructura de riego instalada (pívot o aspersores fijos) pero en las que no se han observado evidencias de su puesta en funcionamiento durante la primavera.

Como podía ser de esperar, las categorías donde la presencia/ausencia de riego ha sido determinada con mayor fiabilidad se corresponden con aquellas donde el cultivo ha sido caracterizado con más seguridad a partir de las visitas de campo (ver Tabla 70), concentrándose gran parte de los potenciales errores detectados en las categorías ligadas a una mayor incertidumbre en el muestreo.

Así, las observaciones en campo indican la presencia de cultivos donde las características de la vegetación pueden resultar similares para cereales en secano y en riego. Se considera que esta situación de coincidencia se produce para casos en donde los primeros se asientan sobre suelos fértiles, corresponden a variedades que han dado un buen resultado y han sido sometidos a prácticas agrarias variadas para mejorar su rendimiento y por el otro lado, en casos donde el riego del cereal se ha producido con dotaciones reducidas.

Esta situación da lugar a la existencia de una zona de conflicto, en las que se han constatado los mayores errores en la identificación del riego. En caso de repetirse una campaña de campo orientada al cereal, se recomienda realizar un trabajo más intensivo para la determinación del riego en cada parcela, una vez que ya se dispone de una segmentación territorial previa y se ha realizado una primera evaluación de la distribución de las características del cultivo a lo largo del territorio.

No obstante, la zona de mayor incertidumbre se encuentra acotada a un conjunto de parcelas limitado, lo cual reduce el margen y trascendencia del error cometido.

Tabla 70. Resumen del proceso de validación del mapa de herbáceos regados en primavera.

Tipología de cereal en campo	Precisión estimada	Tipología de cereal según teledetección	Superficie estimada (ha)
<b>Secano no cuidado</b>	100,0%	<b>Secano</b>	110.000
<b>Secano</b>	97,9%		
<b>Secano cuidado</b>	89,4%		
<b>Posible riego apoyo (sin infr.)</b>	60,3%	<b>Riego de apoyo</b>	9.582
<b>Posible riego apoyo (con infr.)</b>	83,4%		
<b>Riego</b>	97,7%	<b>Riego / Riego intensivo</b>	29.672
<b>Precisión en la identificación del riego</b>		94,2%	

La precisión en la identificación del riego, que mide el grado de acierto en la detección de las parcelas observadas como riego en campo asciende hasta el **94,2%**. La fiabilidad del mapa de cereal en regadío, definida como el porcentaje de acierto obtenido en relación al total de superficie empleado en la validación, se ha estimado en el **91,3%**. El nivel de incertidumbre existente en relación a la muestra de campo motiva que esta cifra deba ser interpretada con cautela, considerándose que el nivel real de acierto debe ser algo superior.

El intervalo de confianza ligado a la cifra de cereal regado se sitúa entre 33.878 y 41.777 hectáreas, considerándose la máxima probabilidad para la cifra obtenida en el estudio de 39.523 hectáreas de cereal en riego. La distribución del intervalo muestra una mayor probabilidad de que la superficie de cereal regado haya podido ser sobreestimada, lo cual incide en la idea de un potencial sesgo al alza en la estimación proporcionada para las extracciones realizadas durante la primavera.

Por último, el mapa de viña en regadío ha sido revisado mediante un proceso de validación basado en el contraste con información de campo recopilada en una campaña específica y con los datos tomados en un vuelo multiespectral de muy alta resolución realizado en tres zonas repartidas a lo largo del acuífero de La Mancha Occidental.

La fiabilidad global del mapa de viña en regadío se ha estimado en el 92,6%, coincidente con el porcentaje de superficie del mapa de viña en regadío que ha sido identificada

correctamente como regadío o seco. El porcentaje correspondiente a parcelas para las que se ha cometido un error en la asignación (7,4%) se divide según el error haya sido de comisión (por incluir en el mapa de viña regada parcelas de seco) o de omisión (por no considerar como riego parcelas en seco), existiendo un efecto de compensación entre ambos errores. A partir de la información generada en este análisis se ha definido un intervalo que contiene a la cifra de viña en regadío y que se acota entre 91.370 y 99.920 hectáreas. El proceso estadístico de los datos disponibles (muestra de campo, mapa que marca la distribución poblacional del viñado y segmentación territorial) a partir del método de expansión directa arroja una cifra de viña regada en el entorno de las 93.395 ha, ubicada dentro del intervalo propuesto y que se acerca mucho al resultado del estudio, que delimita 94.978 ha de viña regada dentro de los acuíferos sobreexplotados.

La disponibilidad de imágenes multispectrales de muy alta resolución ha permitido realizar un análisis de detalle acerca de la tipología y sistemática de los errores cometidos, permitiendo su agrupación en función de diferentes casuísticas. Se ha observado la incidencia de la edad de las plantaciones de viña (15% de los casos), el tamaño y forma de las parcelas (15%), el color y humedad del suelo (12%), así como la ineficiencia de la aproximación metodológica empleada para detectar las diferencias producidas por el riego en las parcelas de viñado (58%).

El grado de ajuste del modelo se ha caracterizado analizando la probabilidad de existencia de riego en las parcelas donde se ha cometido un error en la clasificación. Los errores achacables a un ajuste insuficiente de la metodología se dividen entre los que se han cometido en parcelas con probabilidades muy próximas al umbral tomado para la asignación (un 37%), en parcelas con probabilidades cercanas (un 30%) y aquellas en que no se ha estado cerca de asignar correctamente la presencia/ausencia de riego (un 33%). El porcentaje de acierto en la discriminación de riego, obtenido en el proceso de validación, muestra una relación directa con el dato de probabilidad asignado por el modelo multicriterio.

En la viña, aparecen factores difíciles de evaluar que introducen una parte considerable del error existente. Como consecuencia, la existencia de parcelas donde las plantas muestran una respuesta reducida ante el riego, o de viñedos en seco con elevado desarrollo foliar complica el proceso de clasificación. La escasa representatividad de estos casos permite la obtención de unos resultados aceptables, aunque limita la utilización de técnicas geográficas.

Dado que el proceso de discriminación de la presencia de riego en la viña se basa en el empleo de un modelo, se ha realizado un análisis de su sensibilidad ante cambios en las variables que lo conforman.

En primer lugar, se ha analizado la sensibilidad ante cambios en la variable dependiente, definida por la muestra de campo. La revisión de los datos de campo a partir del vuelo multispectral ha determinado la presencia de errores en el proceso de muestreo,

estimados en el 3,1% de las parcelas y el 2,2% de la superficie, lo que muestra como cualquier fuente de datos queda sujeta a un margen de error, incluso un procedimiento a priori tan fiable como las visitas de campo. El modelo no resulta excesivamente sensible ante los errores en los datos de campo, si bien este resultado se ve condicionado por el tamaño reducido de la muestra disponible para este análisis.

En cuanto a las variables independientes, el análisis se ha centrado en el mapa de índice de vegetación del año, que es el criterio ponderado con mayor fuerza en la mayoría de las zonas. La disponibilidad del vuelo multiespectral ha permitido estimar el potencial mejora que podría obtenerse en caso de usar como fuente de datos imágenes de muy alta resolución espacial. El análisis muestra que la fiabilidad podría aumentarse considerablemente hasta situarse en los niveles del 96-98%, si bien el esfuerzo y coste económico de esta alternativa resultarían notablemente superiores a la solución propuesta en esta Tesis.

### 6.2.2. Comparación de cifras estimadas de cuantificación de superficie regada

La superficie regada en los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana se ha controlado durante los últimos años a partir de tecnologías de información geográfica. Durante los años 2004, 2007 y 2008, la Comisaría de Aguas de la Confederación Hidrográfica del Guadiana ha realizado estudios el efecto orientados al control del cumplimiento de los Regímenes Anuales de Explotación y al seguimiento global de las extracciones. Durante los años 2005 y 2006, estos trabajos fueron ejecutados por la empresa pública Tragsa con objeto de apoyar la redacción del PEAG.

La comparación entre todos los datos disponibles y el posterior análisis de las cifras proporcionan información de interés para la evaluación, dentro de un contexto operativo, de los resultados generados dentro del presente trabajo.

En la Tabla 71 se resumen los resultados obtenidos para los cultivos regados durante la primavera. La lectura de estos resultados debe ir acompañada de los datos de pluviometría media, demostrándose que resulta un factor que condiciona completamente el comportamiento anual de los agricultores y que debe ser tenido en cuenta para poder ajustar los procesos metodológicos a la realidad existente. Los resultados no incluyen al cultivo de ajo, que se encuentra caracterizado como un herbáceo de verano.

Tabla 71. Estimación de superficies regadas (ha) durante la primavera para el periodo 2004-2009

SUPERFICIE REGADA EN PRIMAVERA (ha)					
2004	2005	2006	2007	2008	2009
15.180	27.881	28.291	19.257	24.377	42.392

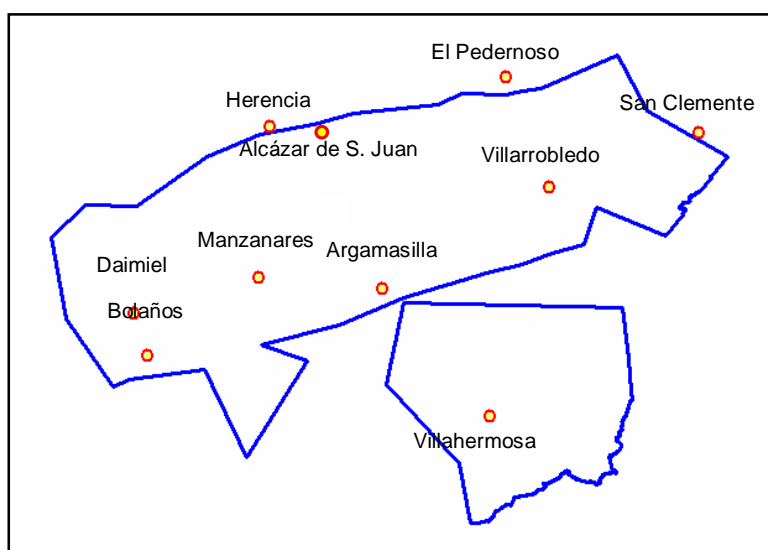
  

Precipitación media en el periodo marzo-mayo (mm)					
251	41	89	201	159	64

El cálculo de la precipitación media se ha efectuado basándose en los datos proporcionados por la red de estaciones climatológicas del SIAR, para el periodo de riego del cereal en la zona, que se extiende durante los meses de marzo y mayo. Aunque existen explotaciones que alargan el periodo de riego hasta mitad de junio, se entiende que no se trata de casos donde la decisión dependa de la climatología del año, sino que se produce en explotaciones donde se busca alargar el ciclo del cultivo para aumentar la producción y donde se ha regado durante los meses anteriores.

Tabla 72. Precipitación anual durante los meses entre marzo y mayo para el periodo 2004 - 2009

	Daimiel	Bolaños	Alcázar	Herencia	Manzanares	Argamasilla	Villahermosa	Villarrobledo	S. Clemente	El Pedernoso	MEDIA
2004	198,6	232,0	280,4	283,0	225,0	232,8	215,0	250,8	249,4	341,4	250,8
2005	41,4	32,2	98,8	26,0	23,2	28,0	59,4	36,2	40,0	26,8	41,2
2006	104,8	114,0	56,8	73,8	58,6	76,2	112,0	66,8	123,2	103,4	89,0
2007	208,8	199,6	179,8	219,6	170,4	168,6	282,0	172,0	214,8	193,6	200,9
2008	186,2	190,0	96,2	160,4	174,4	185,6	91,8	151,0	175,0	176,2	158,7
2009	71,8	64,4	54,0	55,6	54,6	39,8	98,0	62,0	78,4	64,4	64,3



Las precipitaciones en 2004 y 2007 corresponden a años excepcionalmente húmedos, con 251 mm y 201 mm recogidos entre los meses de marzo y mayo; estas precipitaciones suponen dotaciones efectivas de 2.000 y 1.600 m<sup>3</sup>/ha, más que suficientes para sacar adelante el cultivo de cereal. El año 2008 puede considerarse también como húmedo. Por otro lado, los años 2005, 2006 y 2009 representan años secos.

Durante el mes de mayo de 2009, las precipitaciones medidas en las estaciones pluviométricas distribuidas dentro de la zona de estudio se sitúan en valores muy

reducidos (entre los 3 y 13 mm), lo que seguramente ha incidido en el aumento de riego observado.

Las diferencias entre las estimaciones realizadas en diferentes años a partir del empleo de técnicas de teledetección resultan evidentes y se deben principalmente a dos factores:

- La variación en las precipitaciones afecta a la cantidad de agua disponible para el cultivo en cada uno de los años. La existencia de campañas en las que la primavera resulta especialmente seca motiva que una superficie significativa de cultivos sean regados con dotaciones de apoyo con objeto de asegurar la producción del cultivo.

Además del análisis de precipitación total, hay que indicar que la fase de maduración del grano del cultivo, que se extiende fundamentalmente a lo largo del mes de mayo, resulta una época crítica, por lo que la ausencia de lluvias en este periodo (como ha sucedido en 2009), puede empujar a muchos agricultores a apoyar sus cultivos con la aplicación de riegos.

- Las diferencias en las metodologías y datos de partida empleados influye en los resultados obtenidos. En los años 2005 y 2006, la estimación del riego se llevó a cabo a partir del cálculo de valores umbrales del índice normalizado de vegetación (NDVI) sobre el total de los acuíferos. En los años 2004, 2007 y 2008, el proceso incluye varias mejoras en forma de segmentación territorial y aumento de las fechas consideradas. En todos los casos, las imágenes empleadas fueron Landsat. En el año 2009, la mejora viene dada por la disponibilidad de datos de mejor resolución espacial (satélite SPOT) y, en mayor medida, por un esfuerzo metodológico que trata de considerar un mayor número de variables en la discriminación del riego.

Así, los datos estimados para los años 2004, 2007 y 2008 guardan una relación directa con las lluvias acaecidas durante la primavera. Para los años 2005, 2006 y 2009, se podrían esperar datos similares. Dado que no se conoce ninguna causa que explique una posible variación en las prácticas agrícolas en el periodo entre 2005 y 2009, se considera que la diferencia se debe a aspectos metodológicos, fundamentalmente como consecuencia de una mejor detección del riego de apoyo. Esta comparación de resultados sirve para establecer el marco de mejora que ha permitido la metodología propuesta.

En verano, la cifra de superficie de herbáceos en regadío, se mantiene constante, si bien se observa una cierta tendencia hacia la reducción de superficie en los últimos tres años. De nuevo, las cifras proporcionadas para los años 2005 y 2006 parecen las más cuestionables.

Tabla 73. Estimación de superficies regadas (ha) de herbáceos de verano entre 2004 y 2009

TIPO CULTIVO	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Forrajeras de ciclo largo	938	773	1.481	1.156	689	754
Herbáceos en verano	17.758	22.544	14.326	18.707	17.433	16.261
<b>TOTAL (ha)</b>	18.696	23.317	15.807	19.863	18.122	17.015

La robustez de los resultados corrobora la idoneidad del empleo directo de la teledetección para la cuantificación de superficies regadas.

Las mayores diferencias las encontramos en la estimación de la superficie de viña en regadío. Las cifras indicarían un crecimiento de la viña en regadío durante estos últimos años, si bien la fiabilidad de los datos del periodo (2004-2006) es cuestionable. La cifra de viña en regadío en el año 2004 (45.484 ha), está extraída de las declaraciones de la PAC y tiene un sesgo a la baja muy importante.

Por otro lado, para los años 2005 y 2006, la metodología empleada se basa en el cálculo de un índice de vegetación, para el conjunto de la zona de estudio asignándose la existencia de riego en los viñedos únicamente en función de los valores del índice. La mezcla de respuesta procedente del suelo y vegetación que recogen las imágenes de satélite y la enorme variabilidad de estado de desarrollo, características agronómicas, factores ambientales y prácticas agrícolas que existen dentro de una superficie tan amplia condicionan la efectividad de esta metodología, tal y como muestran los resultados obtenidos.

Los datos correspondientes al periodo 2007 – 2009 se han obtenido a partir de una metodología de evaluación multicriterio aplicada de manera separada a un conjunto de zonas delimitadas mediante una segmentación territorial con el apoyo de muestreos de campo. En el año 2007, se empleó una primera aproximación metodológica, que podría considerarse el embrión de la que se presenta en esta investigación y que es similar a la desarrollada en 2008. Sobre esta base, se ha diseñado y construido la metodología usada en el año 2009 y que representa la implementación operativa del desarrollo metodológico que se ha realizado en esta Tesis.

Tabla 74. Estimación de superficies regadas (ha) de cultivos leñosos entre 2004 y 2009

TIPO CULTIVO	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Cultivos leñosos en regadío	45.484	52.572	76.389	94.428	92.134	94.978

Según el análisis llevado a cabo entre 2007 y 2009, parece consolidado, con la complejidad propia de la cultura vitícola (arranques, nuevas plantaciones, riegos de apoyo...), que la superficie de viña en regadío en el perímetro de sobreexplotación, está en el entorno de las 95.000 ha, en un intervalo que puede oscilar entre las 90.000 ha y las 100.000 ha. Estas cifras quedan ratificadas por los procesos de validación.



Como complemento al trabajo de análisis descrito en este apartado, se ha determinado la “superficie en regadío” (ver capítulo 2.1) discriminada dentro de los perímetros sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana durante el periodo 2004-2009. Dado que la principal finalidad de esta aproximación es estimar la demanda hídrica potencial de la agricultura en caso de que se pusiesen en riego en un mismo momento todos aquellos cultivos que han sido regados en los últimos años. Para la elaboración del mapa de superficie en regadío se han considerado los siguientes tipos de cultivos:

- Cultivos leñosos existentes durante el año 2009, que representan el dato actualizado disponible de la distribución de cultivos leñosos que presentan un carácter permanente.
- Cultivos herbáceos regados en alguno de los veranos entre 2004 y 2009.
- Cultivos herbáceos regados en alguna de las primaveras de 2008 ó 2009. Los cultivos regados en primaveras anteriores no se han tenido en cuenta ya que se considera que la existencia de riego se determina con más fiabilidad a partir de otros datos. Por un lado, la parcela podría formar parte de un ciclo de cultivos intensivo interanual y haber sido regada durante alguno de los veranos analizados, o por otro lado, si se trata de una parcela en ciclo de cultivo tradicional, con alternancia de barbechos, debería haber sido regada en alguno de los dos últimos años. Si no cumple ninguna de estas dos características, se considera que el riego no ha podido determinarse con la seguridad suficiente.

Las superficies resultado de la unión de los tres mapas de entrada se recogen, para cada unidad, en la Tabla 75, distinguiéndose entre los siguientes tipos de cultivos: *leñosos*, herbáceos en riego durante algún *verano* entre 2004 y 2009 y herbáceos no regados durante ninguno de los veranos de la serie pero en regadío durante las *primaveras* de 2008 ó 2009.

Tabla 75. Distribución por tipo de cultivo de la superficie en regadío entre 2004 y 2009

UNIDAD	Superficie por tipo de cultivo (ha)			TOTAL
	Primavera	Verano	Leñosos	
UH0404	16.747	58.366	93.511	168.624
UH0406	3.509	654	787	4.950
<b>Subterráneas</b>	20.256	59.020	94.298	173.574
<b>Superficiales</b>	96	2.819	2.212	5.015
<b>TOTAL</b>	20.352	61.839	96.510	178.589

De los datos obtenidos se puede concluir que:

- La viña es el principal cultivo en extensión, siendo además un cultivo permanente que se riega todos los años. Además la reestructuración de gran parte del viñedo

de la zona desde cultivos tradicionales en vaso a cultivos en espaldera supone la necesidad de regar para asegurar la supervivencia de las plantas.

- Los cultivos herbáceos de verano presentan una elevada rotación, a pesar de mantenerse estable la superficie regada en cada uno de los años. La cifra total de cultivos regados se mantiene pero no así la localización de los herbáceos de verano, que muestra un considerable dinamismo.
- La distribución de cultivos regados durante la primavera se encuentra relacionada con el riego de herbáceos de verano, cultivándose cereal en regadío en muchas ocasiones como etapa de descanso tras el cultivo en años anteriores de herbáceos de verano que suponen una mayor intensificación y desgaste de la tierra.

### **6.3. Sobre la utilidad y necesidad de la cuantificación de superficies regadas en la Cuenca Alta del Guadiana**

La presente Tesis se concibe como un desarrollo metodológico, en el que se convierten datos geográficos en información estructurada y temática, con objeto de sentar las bases necesarias para el establecimiento de un proceso objetivo de toma de decisiones.

Durante la investigación, se ha tenido presente la necesidad de mantener un carácter aplicado y operativo, ligado a la implementación de la metodología dentro del ámbito de la Cuenca Alta del Guadiana, donde existen graves conflictos e impactos relacionados con la gestión y uso del agua. Como consecuencia, el mapa de cultivos regados elaborado proporciona una información base para el desarrollo de un conjunto de utilidades relacionadas con la gestión y planificación en los ámbitos hídrico, agronómico e hidrogeológico, que son descritas en este apartado:

#### **a) Cuantificación de superficie agraria en regadío**

En la actualidad los datos que sirven como base para el control y planificación de la actividad agraria anual sobre el territorio son principalmente de tipo estadístico o se basan en encuestas a los propios agricultores.

Las fuentes de datos de las que disponen las administraciones con competencias agrarias se resumen en, por un lado, la ESYRCE (Encuesta de Superficies y Rendimientos de Cultivos en España), generada por el Ministerio y por otro, la compilación de declaraciones de los agricultores para las ayudas de la PAC (Política Agraria Común).

El ESYRCE<sup>14</sup> utiliza el método del marco de muestreo para la generación de datos estadísticos sobre la totalidad de un territorio. Se basa en una recogida intensiva de datos dentro de una muestra de segmentos territoriales repartidos uniformemente dentro del ámbito de trabajo, aunque con un mayor recubrimiento en las zonas con actividad agrícola más intensiva. A partir de estos datos se realiza una estimación general de las superficies de cultivos mediante un proceso de inferencia estadística.

Las cifras obtenidas en este estudio quedan sujetas a varias limitaciones operativas, ya que la unidad mínima de producción es la provincia y además, no se encuentran asociadas a ninguna representación espacial. Por ambos motivos, no resulta posible realizar una desagregación espacial de los datos, lo cual impide su uso para casos como el que nos ocupa, en el que sería necesario conocer la estimación dentro de los perímetros de los acuíferos sobreexplotados. La comparación de los datos estadísticos con el mapa de cultivos regados en la zona estudio no puede realizarse de forma directa, y se ha limitado a la provincia de Ciudad Real. Dentro de esta provincia, la mayoría de las superficies regadas se ubican dentro de los acuíferos sobreexplotados, existiendo además otras zonas con mucha menor extensión y densidad de cultivos regados como son el Campo de Calatrava, la Vega del Jabalón y las Zonas Regables de el Bullaque, Gasset y el Vicario. Así, en el cotejo entre ambas fuentes de datos (ver Tabla 76), las cifras proporcionadas por el ESYRCE deberían presentar un fuerte sesgo al alza al cubrir una mayor superficie, en la que predomina el riego de cereales y herbáceos de verano como alfalfa y maíz, y en menor medida de cultivos leñosos.

Tabla 76. Comparación de datos de superficie regada entre ESYRCE para la provincia de Ciudad Real y el mapa sobre los acuíferos sobreexplotados dentro de esta provincia.

	Superficie regada en 2009 en Ciudad Real (ha)			
	Herbáceos primavera	Herbáceos verano	Leñosos	Total 2009
ESYRCE	25.280	15.105	146.307	186.692
Mapa riego AcSE	32.493	13.580	77.101	123.174

La mayor diferencia aparece en los cultivos leñosos donde el dato estadístico parece que sobreestima considerablemente la cifra real de riego. La cifra proporcionada conllevaría que casi el 80% del viñedo existente en la provincia<sup>15</sup> habría sido regado durante 2009, lo cual parece contradecir la realidad.

Además, la estimación de herbáceos de primavera ya resulta mayor en el mapa de riego a pesar de no cubrir la totalidad de la provincia, mientras que el dato de herbáceos del ESYRCE parece que también podría tener un ligero sesgo a la baja, ya que la superficie

<sup>14</sup> Los resultados para 2009 y el texto descriptivo de la metodología empleada se pueden descargar en <http://www.mapa.es/es/estadistica/pags/encuestacultivos/resultados.htm>

<sup>15</sup> La cifra total de viña en la provincia se estima en 186.817 ha, según los datos publicados por la Consejería de Agricultura de la JCCM en su página web.

ocupada por este tipo de cultivos en las zonas regables no incluidas en el mapa resultaría superior a la diferencia existente.

Otra fuente de datos, son las declaraciones que realizan los agricultores para cumplir las exigencias de la PAC, que permiten la obtención de cifras agrarias a nivel municipal. Se han recopilado los datos correspondientes a los municipios con superficie representativa dentro de los acuíferos sobreexplotados con objeto de compararlos con el mapa de cultivos. De nuevo, la cifra de las declaraciones PAC debería tener un sesgo al alza frente a la cuantificación directa, ya que la superficie cubierta por los municipios seleccionados excede los perímetros de los acuíferos.

Tabla 77. Comparación de datos de superficie regada entre declaraciones PAC y el mapa sobre los acuíferos sobreexplotados.

	Superficie regada en 2009 (ha)			
	Herbáceos primavera	Herbáceos verano	Leñosos	Total 2009
Declaraciones PAC	81.986	19.307	59.333	160.626
Mapa riego AcSE	45.656	14.849	96.510	157.015

A pesar de que la suma total de superficie se encuentra muy próxima, se observan diferencias muy amplias tanto en las cifras referidas a los herbáceos de primavera como a los leñosos. En ambos casos, los datos procedentes de las declaraciones parecen muy alejados de la situación existente. Las razones no son sencillas de señalar, aunque podrían derivar de la condición del cereal como cultivo que puede acogerse directamente a las ayudas de la PAC, al contrario de lo que sucede con la viña.

El análisis efectuado muestra la conveniencia de aproximar las cifras de superficie regada dentro de un territorio a partir de la elaboración de mapas con la suficiente calidad y con una escala de trabajo adecuada, presentando esta aproximación una serie clara de ventajas sobre otras fuentes de datos disponibles:

- Desagregación para cualquier unidad territorial
- Conocimiento de la incertidumbre asociada a los datos
- Mayor fiabilidad de los resultados

## **b) Demanda hídrica real y potencial**

La estimación de la demanda hídrica asociada a la agricultura resulta la aplicación más directa del conocimiento de la distribución de cultivos regados dentro de un territorio.

La disponibilidad de mapas de superficie regada en un periodo concreto (normalmente referidos a un año natural o a un año hidrológico) permite la estimación de la demanda a través de dotaciones estándar derivadas de diferentes fuentes. La incertidumbre asociada a estas dotaciones aconseja la construcción de escenarios ligados a intervalos de

confianza, en los que se determine tanto los valores mínimo y máximo de consumo, como el valor de mayor probabilidad.

La unión espacial de mapas de superficie regada elaborados para una secuencia de años permite realizar una aproximación al mapa de superficie regable del territorio (ver Figura 1). Esta representación abarca el total de superficie dotada de infraestructura de riego en uso. La demanda hídrica ligada a esta superficie marca un máximo de demanda potencial, que se produciría en caso de que el total de explotaciones que han sido regadas durante los últimos años, se pudiesen en riego en una misma campaña.

Ambos datos, representando las cifras y la distribución espacial asociadas al consumo agrícola anual y al máximo consumo potencial resultan claves para poder llevar a cabo tareas y programas ligados a la planificación y gestión hídrica.

La toma de decisiones relacionadas con el uso del agua debe basarse en información fiable y ajustada. Dos de los componentes fundamentales de esta información han de ser los mapas de distribución de cultivos y de demanda hídrica producida por el consumo agrícola. Sin una base adecuada, las medidas y planes acometidos sobre un territorio se encuentran sometidos a limitaciones de partida que condicionan desde un primer momento su posibilidad de éxito.

### **c) Control del régimen anual de explotación a nivel de acuífero y seguimiento de las extracciones**

Las declaraciones de sobreexplotación tanto del acuífero del Campo de Montiel como del de La Mancha Occidental imponen la aprobación de un régimen anual de explotación. Dentro de este régimen se considera un máximo para las extracciones de aguas subterráneas (ver Apéndice A.3.3.3).

Para La Mancha Occidental, el volumen máximo de extracción para el año 2009 se fijó en 200 hm<sup>3</sup> para usos de regadío y de 30 hm<sup>3</sup> para abastecimiento a población, usos industriales y ganaderos. Para el perímetro de sobreexplotación del Campo de Montiel, la cifra máxima para el uso de las aguas subterráneas para riego se limita a 8 hm<sup>3</sup>.

En el caso de La Mancha Occidental, en todos los escenarios planteados se supera con creces el máximo estipulado para 2009. La cifra estimada como más probable para las extracciones para riego asciende hasta los 281,4 hm<sup>3</sup>, lo cual implicaría una infracción a nivel de acuífero del 40% sobre el máximo fijado. Así, los datos generados muestran un incumplimiento severo del régimen de explotación.

Dentro del Campo de Montiel, las extracciones estimadas se estiman en 9,4 hm<sup>3</sup>, lo cual representa igualmente un incumplimiento del régimen impuesto.

Además del control anual de las extracciones, la estimación de superficie regada y consumo durante años sucesivos permite realizar un seguimiento detallado de la evolución de las extracciones. Los acuíferos sobreexplotados han sido una zona muy

estudiada, sin embargo la diversidad de metodologías y criterios utilizados limitan, en gran medida, el análisis evolutivo de los datos de extracciones. Muchas de las cifras propuestas presentan sesgos importantes, produciendo una serie de incertidumbres en los datos, asociada a su falta de fiabilidad.

Debido a este contexto, resulta necesario establecer metodologías que permitan una comparación directa de los datos, bien por que se basen en un mismo conjunto de criterios, bien porque la fiabilidad asociada a los datos obtenidos sea elevada y se encuentre evaluada y expresada convenientemente.

A partir del cumplimiento de esta condición será posible realizar un seguimiento de mayor detalle acerca de la evolución de las extracciones, lo cual redundará en una mejora de los elementos de juicio necesarios para el establecimiento de políticas de planificación, y el seguimiento de medidas y escenarios acordados para el control de las extracciones.

#### **d) Integración en modelos hidrogeológicos**

Los acuíferos de la Llanura Manchega se encuentran, sin duda, entre los más estudiados desde una perspectiva hidrogeológica, especialmente en el caso de la unidad de La Mancha Occidental. El conocimiento del funcionamiento de los acuíferos se basa en datos de piezometría y de sondeos geológicos, sobre los cuales se ha modelizado el flujo de las aguas subterráneas.

Tradicionalmente, los mapas de estimación de las extracciones y de distribución del riego no han sido considerados dentro de los modelos, estimándose las cifras de extracciones de forma general a partir de las estadísticas agrarias. No obstante, la distribución de las extracciones y de las superficies de riego aportan información de interés tanto para la calibración y ajuste de los modelos como para conseguir una optimización de su diseño.

Con objeto de mostrar las posibilidades de integración entre los datos espaciales de distribución de consumo y superficie de riego en la modelización hidrológica, se ha preparado un mapa que agrupa los resultados obtenidos por celdas de uno de los modelos hidrogeológicos

En la Figura 70, se recoge la presentación de los datos de consumo estimado distribuidos según una malla de 1 kilómetro de lado. Las cifras de consumo han sido agrupadas en intervalos regulares para facilitar la interpretación de los datos, representando el total de consumo estimado dentro de cada celda, indistintamente del origen del agua.

Este mapa se complementa con la figura que muestra la situación estimada de las isopiezas en el año 2006 para el acuífero de La Mancha Occidental, con objeto de mostrar la coherencia espacial existente entre ambos datos y mostrar su potencial de integración.





### **e) Seguimiento de programas y políticas territoriales**

El ámbito territorial de la Cuenca Alta del Guadiana está afectado por un conjunto de políticas que tratan de marcar las directrices generales relacionadas con la gestión hídrica y agrícola.

El Plan Especial del Alto Guadiana (PEAG) contiene diversos programas de medidas encaminadas de forma directa hacia el objetivo general de conseguir un buen estado en las masas de aguas superficiales y subterráneas de la Cuenca Alta del Guadiana, en cumplimiento de las obligaciones adquiridas a través de la transposición de la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea (ver Apéndice A.3.5). Este objetivo se trata de alcanzar sin perjuicio de la actividad económica de la zona, sustentada en una parte importante por el sector agrario, que a su vez, es el principal consumidor de los recursos hídricos subterráneos.

Así, las políticas hídricas y agrarias, promovidas y gestionadas por diferentes Administraciones se encuentran muy ligadas, considerándose que su falta de integración en muchos casos ha dificultado la consecución de los objetivos propuestos, principalmente, desde el punto de vista ambiental e hídrico.

El uso de técnicas geográficas permite la obtención de información objetiva que debería ayudar a una mayor sinergia en el diseño y aplicación de las diferentes políticas territoriales.

Desde una perspectiva más específica, existen varias medidas y programas concretos cuyo diseño y grado de cumplimiento podrían mejorarse u optimizarse a partir del empleo de mapas de superficie regada y de demanda hídrica.

Uno de los principales programas del PEAG se centra en la compra de derechos de riego con objeto de recuperar recursos y contribuir a una reducción de las extracciones al mismo tiempo que se compensa a los agricultores por la reducción de rendimiento de su actividad. La disponibilidad de mapas de demanda hídrica anual está permitiendo a la Administración un mayor orden y efectividad en la compra de los derechos, favoreciendo la adquisición de derechos en aquellas explotaciones donde se constata una elevada frecuencia de riego y un mayor consumo de recursos hídricos en los últimos años. La existencia de una secuencia temporal de datos espaciales sobre el territorio refuerza los controles directos que se realizan antes de cada adquisición y ayuda a una priorización en el proceso de compra de derechos.

El seguimiento mediante teledetección también puede emplearse de forma directa para la monitorización del cumplimiento de planes relacionados con el cambio de uso del terreno, como los programas de reforestación.

Desde una perspectiva de medidas agrícolas, el empleo de los mapas de cultivos presenta dos aplicaciones directas, como serían el control del cumplimiento de las

declaraciones de la PAC y el seguimiento territorial de los arranques y de nuevas plantaciones de viña llevados a cabo al amparo de los Planes de reestructuración del sector vitivinícola que viene realizando la Junta de Castilla La Mancha.

#### **f) Control de ilegales e infractores del régimen de explotación**

La aprobación de la Ley de Aguas 29/1985 y los preceptos establecidos en sus Disposiciones Transitorias 3ª y 4ª supusieron un cambio total en la propiedad del agua subterránea que pasa a incorporarse al Dominio Público siempre que sea de carácter renovable. El uso privativo de los recursos subterráneos pasa a enclavarse dentro de un régimen concesional en el que los aprovechamientos permitidos deben ser inscritos en un Catálogo de Aguas Privadas o en un Registro de Aguas.

El proceso de inscripción conlleva el establecimiento de una superficie máxima de riego y la definición espacial de las parcelas asociadas a cada aprovechamiento, al mismo tiempo que se fijan las características y volumen máximo utilizable para cada captación.

Así, cualquier uso del agua para riego que no se produzca a partir de una captación inscrita o que se realice sobre un exceso de superficie o fuera del área autorizada se considera que tiene un carácter ilegal.

Por otro lado, en la misma Ley de Aguas, se incluye la figura de la declaración de sobreexplotación de acuíferos como una herramienta para mejorar la gestión de acuíferos en situación de sobredemanda (ver apéndice A.3.3.3). Los regímenes de sobreexplotación de los acuíferos de La Mancha Occidental y Campo de Montiel imponen limitaciones anuales de extracciones sobre explotaciones individualizadas a nombre de un mismo titular y en un mismo municipio (con algunas salvedades que se especifican), y que se fijan en relación al total de la superficie inscrita.

La posibilidad de discriminar superficies regadas para cada tipo de cultivo y su integración con la cartografía de derechos de uso de agua permite la detección tanto de explotaciones no declaradas como de explotaciones en situación de infracción por incumplimiento del régimen anual de explotación. En un contexto operativo, las deficiencias existentes en la base cartográfica y algunas limitaciones prácticas dificultan la realización de este tipo de seguimientos. No obstante el control de las extracciones a nivel de explotación se convierte en una de las principales aplicaciones de los resultados obtenidos a partir de la metodología desarrollada en esta Tesis Doctoral.

# Delimitación de superficies regadas a partir de técnicas geográficas: aplicación en la cuenca alta del Guadiana

## APÉNDICE: TERRITORIO, PROBLEMÁTICA Y GESTIÓN HÍDRICA



**MANUEL BEA MARTÍNEZ**

**Codirectores:**

**Dr. José Antonio Rodríguez Esteban**

**Dr. Salomón Montesinos Aranda**



**DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA**

#### IMÁGENES DE LA PORTADA DEL APÉNDICE

- 1.- Cultivo de viña en espaldera, regado mediante goteo.
- 2.- Vista general de la Llanura Manchega.
- 3.- Laguna del camino de Villafranca, en Alcázar de San Juan.

## ÍNDICE GENERAL DEL APÉNDICE

<b>A.1. TERRITORIO: LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA.....</b>	<b>A.1</b>
A.1.1. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	A.1
A.1.2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	A.7
A.1.2.1. Rasgos geológicos .....	A.7
A.1.2.2. Rasgos climáticos.....	A.9
A.1.2.3. Hidrología superficial .....	A.14
A.1.2.4. Hidrología subterránea .....	A.18
A.1.2.5. Fauna y flora.....	A.30
A.1.3. MEDIO SOCIOECONÓMICO .....	A.36
A.1.3.1. Demografía.....	A.36
A.1.3.2. Marco económico .....	A.38
<b>A.2. AGUA: PROBLEMÁTICA EN LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA .....</b>	<b>A.43</b>
A.2.1. LA RELACIÓN HISTÓRICA ENTRE HOMBRE Y AGUA EN LA REGIÓN DE LA MANCHA.....	A.43
A.2.2. DESARROLLO E IMPORTANCIA DE LA AGRICULTURA DE REGADÍO EN LA REGIÓN .....	A.47
A.2.2.1. Desarrollo histórico del uso de los recursos hídricos para agricultura .....	A.47
A.2.2.2. Evolución de superficie regada en la Llanura Manchega y Campo de Montiel .....	A.49
A.2.2.3. Características de los regadíos en la Llanura Manchega y Campo de Montiel.....	A.53
A.2.2.4. Importancia del sector agrícola en la Llanura Manchega .....	A.56
A.2.3. PROBLEMÁTICA POR LA SOBREEXPLOTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS.....	A.57
A.2.3.1. Balances hídricos de los sistemas hidrogeológicos sobreexplotados: causas y efectos de su alteración .....	A.58
A.2.3.2. El problema ecológico y socioeconómico de la Mancha .....	A.64
A.2.4. CONSECUENCIAS DE LA SOBREEXPLOTACIÓN SOBRE LAS ZONAS HÚMEDAS .....	A.67
A.2.4.1. Parque Nacional de las Tablas de Daimiel .....	A.70
A.2.4.2. Parque Natural de las Lagunas de Ruidera .....	A.80
A.2.4.3. Otros humedales de La Mancha Húmeda .....	A.88
<b>A.3. GESTIÓN HIDROLÓGICA: EVOLUCIÓN Y PERSPECTIVA.....</b>	<b>A.95</b>
A.3.1. SITUACIÓN HISTÓRICA DE PARTIDA .....	A.96
A.3.2. INICIO Y EXTENSIÓN DE LA PROBLEMÁTICA HÍDRICA (1951 – 1985) .....	A.98
A.3.3. LEY 29/1985 DE AGUAS.....	A.105
A.3.3.1. Motivación de la Ley de Aguas de 1985. ....	A.105
A.3.3.2. El Registro y el Catálogo de Aguas Privadas .....	A.106
A.3.3.3. La figura de sobreexplotación de acuíferos .....	A.112
A.3.4. DIRECTIVA MARCO DE AGUAS DE LA COMISIÓN EUROPEA.....	A.117

A.3.5. PLAN ESPECIAL DEL ALTO GUADIANA (PEAG) .....	A.119
A.3.5.1. <i>Marco general y objeto del Plan</i> .....	A.121
A.3.5.2. <i>Herramientas y programas de medidas de actuación</i> .....	A.122
A.3.5.3. <i>Objetivos ambientales</i> .....	A.125
A.3.6. EL CAMBIO DE VISIÓN Y RETOS DE FUTURO .....	A.128

## ÍNDICE DE TABLAS DEL APÉNDICE

TABLA A.1. SUBCUENCAS EN LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA .....	A.3
TABLA A.2. SUPERFICIE DE LOS PERÍMETROS DE SOBREEXPLOTACIÓN DENTRO DE CADA PROVINCIA .....	A.6
TABLA A.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS PRINCIPALES RÍOS Y SUBCUENCAS DE LA REGIÓN.....	A.17
TABLA A.4. CORRESPONDENCIA ENTRE DENOMINACIÓN PREVIA Y ACTUAL DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS .....	A.19
TABLA A.5. CARACTERÍSTICAS DEL ACUÍFERO DE LA MANCHA OCCIDENTAL.....	A.24
TABLA A.6. CARACTERÍSTICAS DE LAS UU.HH. DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA. ....	A.27
TABLA A.7. CORRESPONDENCIA ENTRE UU.HH. Y MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA .....	A.28
TABLA A. 8. DISTRIBUCIÓN (%) DE OCUPACIÓN POR SECTORES EN EL AÑO 2000.....	A.39
TABLA A.9. FUNCIONES Y SERVICIOS DE LOS HUMEDALES MANCHEGOS .....	A.46
TABLA A.10. TIPOS DE CULTIVOS EXISTENTES DENTRO DE LOS ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA .....	A.54
TABLA A. 11. ESPACIOS NATURALES DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA INCLUIDOS DENTRO DE LA PROPUESTA DE RED NATURA 2000 .....	A.69
TABLA A.12. SUPERFICIE ENCHARCABLE EN LA MANCHA HÚMEDA EN 1982.....	A.89
TABLA A.13. ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LOS HUMEDALES INVENTARIADOS EN 2007 .....	A.89
TABLA A.14. ESTADO DE CONSERVACIÓN DE LOS HUMEDALES INVENTARIADOS EN 2007 SEGÚN SU CATEGORÍA DE INTERÉS.....	A.90
TABLA A.15. VOLUMEN MÁXIMO PERMITIDO POR EXPLOTACIÓN SEGÚN EL RÉGIMEN DE EXPLOTACIÓN DEL ACUÍFERO DE LA MANCHA OCCIDENTAL DEL AÑO 2000.....	A.114
TABLA A.16. DOTACIONES ESTÁNDAR PARA CADA TIPO DE CULTIVO SEGÚN EL PLAN DE ORDENACIÓN DE LAS EXTRACCIONES DEL ACUÍFERO DE LA MANCHA OCCIDENTAL .....	A.115
TABLA A.17. OBJETIVOS AMBIENTALES DEL PEAG .....	A.127



## ÍNDICE DE FIGURAS DEL APÉNDICE

FIGURA A. 1. UBICACIÓN DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA DENTRO DE LA PENÍNSULA IBÉRICA .....	A.2
FIGURA A.2. DELIMITACIÓN DE LAS ZONAS SOBREEXPLOTADAS EN LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA .....	A.6
FIGURA A.3. PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (MM/AÑO) EN LAS ESTACIONES SIAR DE LA ZONA DE ESTUDIO DURANTE EL PERIODO 2000 – 2009 .....	A.11
FIGURA A.4. TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C) EN LAS ESTACIONES SIAR DE LA ZONA DE ESTUDIO DURANTE EL PERIODO 2000 – 2009 .....	A.12
FIGURA A. 5. RELACIÓN ENTRE PRECIPITACIONES Y TEMPERATURAS MEDIAS MENSUALES EN LAS TABLAS DE DAIMIEL DURANTE EL PERIODO 1904-2002 .....	A.13
FIGURA A.6. DISTRIBUCIÓN DE LOS PRINCIPALES RÍOS Y SUBCUENCAS.....	A.17
FIGURA A. 7. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS UBICADAS DENTRO DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA ...	A.20
FIGURA A.8. DISTRIBUCIÓN DE LAS MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA .....	A.29
FIGURA A.9. DISTRIBUCIÓN DE LOS PERÍMETROS SOBREEXPLOTADOS Y DE LOS PRINCIPALES RÍOS DENTRO DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA SOBRE UN MAPA DE RELIEVE DEL TERRENO.....	A.30
FIGURA A.10. FOTOGRAFÍAS DE AVES PROPIAS DE MEDIOS ESTEPARIOS Y ACUÁTICOS DE LA MANCHA.....	A.35
FIGURA A.11. POTENCIAL DE FUTURO DEMOGRÁFICO DE LOS MUNICIPIOS DE LA CUENCA ALTA Y LÍMITE DE LOS PERÍMETROS DE SOBREEXPLOTACIÓN .....	A.38
FIGURA A.12. EVOLUCIÓN DE LA POBLACIÓN EN LA LLANURA MANCHEGA ENTRE 1900 Y 1970 .....	A.48
FIGURA A.13. EVOLUCIÓN ESTIMADA DE LAS SUPERFICIES REGADAS EN LA MANCHA OCCIDENTAL EN EL PERIODO 1974 -1994 .....	A.51
FIGURA A.14. EVOLUCIÓN ESTIMADA DE LAS EXTRACCIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS (HM <sup>3</sup> ) EN EL ACUÍFERO DE LA MANCHA OCCIDENTAL.....	A.52
FIGURA A.15. ELEMENTOS A CONSIDERAR EN EL BALANCE HÍDRICO .....	A.59
FIGURA A.16. BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO DE LA LLANURA MANCHEGA EN RÉGIMEN NATURAL. ....	A.60
FIGURA A.17. NIVELES PIEZOMÉTRICOS DE LA MANCHA OCCIDENTAL EN RÉGIMEN NATURAL .....	A.62
FIGURA A.18. NIVELES PIEZOMÉTRICOS DEL ACUÍFERO DE LA MANCHA OCCIDENTAL EN 2006.....	A.63
FIGURA A.19. BALANCE HÍDRICO DEL ACUÍFERO DE LA LLANURA MANCHEGA EN LA ACTUALIDAD. ....	A.64
FIGURA A.20. DELIMITACIÓN DE LICs Y ZEPAS DENTRO DE LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA .....	A.68
FIGURA A. 21. DELIMITACIÓN DEL PARQUE NACIONAL DE LAS TABLAS DE DAIMIEL Y DE LA SUPERFICIE ENCHARCABLE EN RÉGIMEN NATURAL .....	A.71
FIGURA A.22. FOTOGRAFÍAS AÉREAS DE LOS AÑOS 1956 Y 2006 SOBRE LOS OJOS DEL GUADIANA Y EL CAUCE DEL RÍO HASTA SU DESBORDAMIENTO EN LAS TABLAS .....	A.76
FIGURA A.23. DELIMITACIÓN DEL PARQUE NATURAL DE LAS LAGUNAS DE RUIDERA Y SITUACIÓN DE LAS LAGUNAS PRINCIPALES .....	A.81
FIGURA A.24. COMPARACIÓN DE AGUA EMBALSADA EN EL PANTANO DE PEÑARROYA ENTRE AGOSTO DE 1985 Y AGOSTO DE 2005.....	A.87
FIGURA A.25. ZONAS HÚMEDAS EN LA CUENCA ALTA Y HUMEDALES INCLUIDOS EN EL PLAN DE SEGUIMIENTO REGULAR.....	A.92

# **A.1. Territorio: la Cuenca Alta del Guadiana**



**Portada del capítulo 1 del Apéndice: Vista de la Llanura Manchega**

## **A.1. TERRITORIO: LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA**

### **A.1.1. Delimitación de la zona de estudio**

La Cuenca Alta del Guadiana constituye, por definición, la zona de cabecera de la cuenca hidrográfica del río Guadiana, formando una región natural con una extensión aproximada de 18.900 km<sup>2</sup>, dentro la Submeseta Meridional Castellana y encontrándose situada entre los Montes de Toledo, la Cordillera Ibérica, el Campo de Montiel y los Llanos de Albacete (Figura A.1).

La delimitación de la cuenca hidrográfica del Guadiana quedó definida por el RD 650/1987, de 8 de mayo, donde además se establece que este ámbito territorial coincidirá con la demarcación del plan hidrológico, que ha sido fijada por el RD 124/2007, de 2 de febrero.

En relación a la Cuenca Alta, aunque se pueden encontrar referencias distintas en varios estudios, que oscilan entre los 16.200 y los 22.830 km<sup>2</sup>, la delimitación aceptada en la actualidad y empleada en este estudio es la definida dentro del Plan Especial del Alto Guadiana, que dota de carácter oficial a esta zonificación geográfica.

La Cuenca Alta del Guadiana queda conformada por un total de 173 subcuencas según la cartografía definida en la actualidad por la Confederación Hidrográfica<sup>1</sup>, quedando algunas de ellas comprendidas dentro de otras subcuencas de mayor entidad. Este conjunto de subcuencas queda enumerado en la Tabla A.1.

Sus límites son las divisorias hidrográficas con las cuencas de los ríos Tago al norte, Guadalquivir al sur y Júcar al este, extendiéndose hacia el oeste hasta la confluencia de los ríos Jabalón y Guadiana, englobando la subcuenca del primero. Incluye los sistemas fluviales del Gigüela-Záncara, Jabalón, Bañuelos, Azuer y Pinilla.

Por último, hay que mencionar, que la divisoria de aguas entre las cuencas del Júcar y el Guadiana fue modificada y ajustada por la Orden ARM/3797/2008, en la que se define a nivel cartográfico la línea común de separación entre ambas cuencas, lo cual afecta directamente al límite de la Cuenca Alta.

---

<sup>1</sup> Esta cartografía se encuentra disponible para su descarga en la siguiente dirección electrónica:  
<<http://www.chguadiana.es/?url=la+cuenca+hidrogr%E1fica+informaci%C3n+cartogr%E1fica+descarga+de+cartograf%EDa&corp=chguadiana&lang=es&mode=view>> [Última consulta en diciembre de 2010]



Figura A. 1.- Ubicación de la Cuenca Alta del Guadiana dentro de la península ibérica



Tabla A.1. Subcuencas en la Cuenca Alta del Guadiana (Fuente: Cartografía CHG, elaboración propia)

NOMBRE DE LA SUBCUENCA	NÚMERO DE UNIDADES	SUPERFICIE (km <sup>2</sup> )
Acequia Albardana	1	248,5
Arroyo Añavete	1	99,0
Arroyo Bendija	1	121,9
Arroyo de Buenvecino	1	65,5
Arroyo de Cañada Honda	1	29,5
Arroyo de Fuente Gimeno	1	50,0
Arroyo de Juan Muñoz	1	62,9
Arroyo de Jumelo	1	99,2
Arroyo de la Blanca	1	235,4
Arroyo de la Cañada de Tovar	1	43,6
Arroyo de la Cañada del Alcalde	2	212,9
Arroyo de la Cañada del Tobar	1	43,7
Arroyo de la Cañada del Torrejon	1	114,6
Arroyo de la Fuente del Villar	1	57,4
Arroyo de la Gredera	1	32,5
Arroyo de la Rambla	2	84,2
Arroyo de la Ramblilla	1	56,2
Arroyo de las Cañadas	1	72,7
Arroyo de las Caleruelas	1	129,3
Arroyo de las Laderas	1	198,7
Arroyo de las Peñuelas	1	40,2
Arroyo de Miguel Cobo	1	30,2
Arroyo de Mora	1	67,2
Arroyo de Sequillo	2	83,0
Arroyo de Valdecañas o de las Motillas	2	448,6
Arroyo de Valdelacasa	1	16,5
Arroyo de Valdepino	1	68,8
Arroyo de Valdespino	1	34,8
Arroyo de Villaverde	1	207,0
Arroyo del Alarconcillo	1	127,9
Arroyo del Buey	1	105,9
Arroyo del Cazarejo	1	152,0
Arroyo del Derramadero de Turra	1	47,8
Arroyo del Oregón	1	107,8
Arroyo del Retamar	1	231,3
Arroyo del Sabinar	1	125,8
Arroyo del Seco	1	131,3
Arroyo del Tapujar	1	30,0
Arroyo del Toconar	1	13,7
Arroyo el Riachuelo	1	11,4
Arroyo Laguna	1	95,9
Arroyo Pellerejo	1	39,0
Barranco del Molinillo	1	235,4

..../..

NOMBRE DE LA SUBCUENCA	NÚMERO DE UNIDADES	SUPERFICIE (km <sup>2</sup> )
Barranco del Picado	1	105,5
Cañada de Camargo	1	71,6
Cañada de las Azadillas	1	35,4
Cañada de Santa Cruz	1	11,3
Cañada de Valdelobos	1	644,5
Cañada del Pardo	1	31,2
Cañada del Torrejon	1	142,5
Cañada Grande del Fraile	1	69,5
Rambla de Castellar	2	137,6
Rambla de Santa Cruz de Mudela	1	194,4
Rambla del Camino de Juan Abad	1	103,5
Reguera del Molinillo	1	25,7
Río Alambra	1	157,9
Río Amarguillo	1	458,1
Rio Azuer	6	630,2
Rio Bañuelos	3	107,7
Rio Blanco	1	114,7
Rio Cañamares	3	159,5
Rio Córcoles	2	846,8
Rio de la Becea	1	170,3
Rio de la Peñuela	1	35,1
Rio de la Vega	2	80,8
Rio de las Ánimas	1	220,1
Rio de las Lagunas	2	53,1
Rio de Santa María del Campo	1	183,0
Rio de Valdejudíos	1	64,7
Rio del Santo	1	35,8
Rio del Toconar	1	150,6
Rio del Tortillo	1	70,4
Rio Gigüela	10	816,6
Rio Guadiana	12	1.557,6
Rio Jabalón	9	1.158,0
Rio Jualón	1	59,6
Rio Pinilla	2	188,9
Rio Riansares	8	789,7
Rio Rus	3	707,9
Rio Saona	2	288,7
Rio Valdepineda	1	42,4
Rio Valparaíso	1	48,0
Rio Záncara	18	780,3
Subcuencas s/n	15	2.249,3
Zanja de la Alebosa	1	368,7
Zanja de la Veguilla	1	224,9
<b>TOTAL</b>	<b>173</b>	<b>18.901,4</b>



Dentro de la Cuenca Alta del Guadiana, la investigación se ha centrado en las zonas que en la actualidad se encuentran declaradas como sobreexplotadas desde el punto de vista hídrico: las unidades hidrogeológicas de La Mancha Occidental y del Campo de Montiel.

El perímetro de sobreexplotación de la unidad de La Mancha Occidental ha sufrido importantes cambios en sus límites desde su definición inicial.

La primera delimitación se produjo tras la declaración de sobreexplotación definitiva acordada por la Junta de Gobierno de la Confederación Hidrográfica del Guadiana (en adelante, CHG) en su reunión del 15 de diciembre de 1994.

Sin embargo, el Tribunal Supremo, con fecha 1 de diciembre de 2003, declaró nula esta delimitación, al estimar la existencia de un defecto grave por haberse ampliado la zona inicialmente delimitada en la declaración provisional de sobreexplotación del acuífero, acordada por el Organismo de cuenca el 4 de febrero de 1987.

En cumplimiento del fallo de la mencionada Sentencia, la Junta de Gobierno de la CHG, el 14 de julio de 2004, acordó limitar el perímetro de sobreexplotación en vigor al definido en la declaración provisional de sobreexplotación. En la misma reunión, y al amparo de lo establecido en el artículo 56 del Texto Refundido de la Ley de Aguas (TRLA), aprobado por el RDL 1/2001 de 20 de julio, acordó la apertura de un expediente para la declaración de sobreexplotación de un perímetro adicional en el acuífero de La Mancha Occidental.

Este procedimiento de ampliación se realiza de conformidad con el artículo 171 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (RDPH), modificado por el RD 606/2003, de 23 de mayo, y queda justificado por las conclusiones de un informe recabado al Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y por dictamen favorable del Consejo del Agua de la CHG, en convocatoria de 18 de diciembre de 2007.

Tras la desestimación razonada de todas las alegaciones presentadas en el proceso de información pública por diferentes personas físicas y jurídicas a la propuesta de ampliación presentada por la Comisaría de Aguas y aprobada por la Junta de Gobierno de la CHG con fecha 13 de marzo de 2008, se define una zona de ampliación del perímetro provisional de sobreexplotación. La delimitación de este área territorial se encuentra publicada en el DOCM número 209, de 10 de octubre, donde se incluye un anuncio al respecto por parte de la CHG.

De esta forma el perímetro de sobreexplotación del acuífero de La Mancha Occidental en vigor, y que será utilizado en el estudio queda conformado por el perímetro definido en la declaración provisional de 1987 junto a la ampliación aprobada en 2008.

Por otro lado, el perímetro de sobreexplotación del acuífero del Campo de Montiel queda definido en la resolución de la Dirección General de Obras Hidráulicas, de fecha 12 de junio de 1989. Mediante esta resolución se aprobó la declaración definitiva de sobreexplotación del acuífero junto a su correspondiente Plan de Ordenación de las

Extracciones. En la Figura A.2 se representan las delimitaciones de los dos perímetros de sobreexplotación en el ámbito de la Cuenca Alta del Guadiana.



Figura A.2.- Delimitación de las zonas sobreexplotadas dentro de la Cuenca Alta del Guadiana

Tabla A.2. Superficie de los perímetros de sobreexplotación dentro de cada provincia (Elaboración propia)

Perímetro	Superficie (ha) y Porcentaje (%)		
	Albacete	Ciudad Real	Cuenca
<b>P.S. Mancha Occidental</b>	60.129,7 (11,7%)	378.252,0 (73,8%)	74.302,0 (14,5%)
<b>P.S. Campo de Montiel</b>	92.895,2 (55,4%)	74.730,1 (44,6%)	0,0
<b>AcSE Cuenca Alta</b>	153.024,9 (22,5%)	452.982,1 (66,6%)	74.302,0 (10,9%)

### **A.1.2. Características generales de la zona de estudio**

Como primera aproximación del análisis territorial, se considera conveniente realizar una descripción general de las principales características de la región.

En este apartado, se muestra una visión de síntesis del marco físico, hidrológico y biológico de la zona de estudio que sirva para ayudar a una mejor comprensión y enfoque de los objetivos planteados en el presente trabajo de investigación.

El elemento que sin duda proporciona unidad al área de estudio es la morfología. La extensión y horizontalidad de la llanura donde se sitúa el acuífero de La Mancha Occidental se erigen en los factores que permiten identificar la zona. El acuífero del Campo de Montiel situado en una penillanura adyacente presenta condiciones similares. Dentro de ambas zonas, la unidad paisajística, creada principalmente por la uniformidad en el relieve, coincide con otras agrupaciones de carácter hidrológico, edafológico, hidrogeológico, agrícola o socioeconómico que presentan igualmente características muy homogéneas.

El proceso geológico de formación de las llanuras de La Mancha Occidental y del Campo de Montiel ha originado un territorio definido por amplias superficies sin apenas relieve y que se encuentran conectadas, desde un punto de vista hidrogeológico, por un sistema de acuíferos relacionados. Esta circunstancia ha influido en la vocación del territorio, que desde el punto de vista de la ocupación y aprovechamiento humano, resulta muy similar dentro de la llanura. Por estos motivos, el análisis de la problemática hídrica existente debe llevarse a cabo desde una perspectiva que afecte al conjunto del territorio, tomando en consideración el total de la Cuenca Alta del Guadiana.

#### **A.1.2.1. Rasgos geológicos**

La zona de estudio se caracteriza por encontrarse dentro de la región de la Llanura Manchega, en la Meseta Central. Dentro del contexto geológico de la Península Ibérica, la Cuenca Alta del Guadiana ocupa terrenos pertenecientes al orógeno alpino. Se encuentra básicamente instalada sobre el denominado zócalo hercínico de la meseta sur. Sobre este zócalo de edad paleozoica aparecen otras formaciones más recientes. Se trata de series sedimentadas que, al quedar situadas sobre una base rígida, no han sido afectadas directamente por plegamientos posteriores. Por este motivo la Cuenca Alta se caracteriza por el predominio de relieves suaves. Su altitud queda comprendida entre los 600 metros, en la parte más occidental, hasta cerca de los 800 en las zonas adyacentes a la cuenca del Júcar, encontrándose cerrada por elevaciones próximas a los 1.000 metros tanto al norte como al sur.

Se pueden distinguir cuatro dominios geoestructurales claramente diferenciados (CHG, 1988):

- La Sierra de Altomira y las alineaciones asociadas, pertenecientes a la Cordillera Ibérica y que mantienen su misma directriz tectónica, con secuencias plegadas del Mesozoico y Paleógeno separadas por franjas neógenas (Mioceno a Cuaternario) sin apenas deformación. Entre unas y otras discurren los ríos Záncara, Gigüela, Riansares, Rus y Saona, drenando gran parte de la provincia de Cuenca hacia la Llanura Manchega, que actúa como una especie de esponja, contribuyendo este agua al llenado del acuífero de La Mancha Occidental. Este área presenta alturas comprendidas entre los 700 y los 1.000 metros.
- La Mancha de Toledo o Mancha Norte, es una penillanura situada al norte de la Llanura Manchega, en las estribaciones de los Montes de Toledo, y atravesada por los ríos Riansares, Gigüela y Amarguillo. Se trata de una zona de origen tectónico típica, con estructura de plataforma con cobertera tabular dentro de un intervalo de altura entre los 600 y 800 metros.
- El Campo de Montiel, donde se ubican las Lagunas de Ruidera. Esta comarca, situada entre las provincias de Albacete y Ciudad Real, está constituida por terrenos Jurásicos y Triásicos, pertenecientes al contexto de las series sedimentadas de las Béticas, pero conformando amplias altiplanicies entre 850 y 1.000 metros sobre el nivel del mar, apenas afectadas por el plegamiento alpino, aunque sí por la erosión remontante de los ríos. En esta zona nacen los ríos Córcoles, Pinilla, Azuer y Jabalón de los cuales sólo el último discurre por terrenos relativamente impermeables y no va a parar al acuífero de la Llanura Manchega.
- La Llanura Central Manchega que ocupa la zona central de la Cuenca Alta. Se trata de una gran fosa geológica rellena de materiales miocenos y pliocuaternarios de gran horizontalidad (Peinado, 1980). La base de la fosa queda delimitada por el zócalo centroibérico paleozoico de la submeseta castellana. Sobre este zócalo hundido más rígido aparecen rocas de origen mesozoico. El conjunto de materiales que forman este sustrato es prolongación de las unidades vecinas y su disposición indica que ha habido un progresivo hundimiento de la fosa durante el Mesozoico y la primera parte del Terciario.

Se extiende en suave declive desde los 800 a los 600 metros: al sur hasta el pie del Campo de Montiel, y hacia el este por los llanos de Albacete, hacia la cuenca del Júcar. Al oeste, Guadiana abajo, la fosa geológica manchega va perdiendo profundidad y a la altura de la población de Ciudad Real la potencia de las capas sedimentarias se reduce ya enormemente quedando el zócalo centroibérico a poca distancia de la superficie.

La escasa elevación de los bordes naturales de la Cuenca Alta es una de las causas de la escasez de lluvia que se registra en la misma, al quedar muy limitado el efecto de tipo orogénico en la generación de precipitaciones.

Los suelos desarrollados en la Cuenca Alta presentan las características que imprimen en su origen geológico las condiciones climáticas de la región. Predominan los suelos de origen calizo, con gran riqueza de carbonatos, más pobres y lavados en las zonas más accidentadas y de mayor precipitación.

El área que presenta características edafológicas más diferenciadas respecto del resto de la Cuenca Alta es sin duda el bajo valle del Gigüela debido a que el nivel de carbonatos sódicos en este área es muy elevado con la consiguiente salinización de las aguas del río. Asimismo aparece una considerable proporción de suelos con alto contenido en sulfatos que condicionan en gran medida la calidad de las aguas superficiales (CHG, 1992).

La zona de mayor interés desde el punto de vista de aprovechamiento agrícola es la Llanura Manchega, cuyos suelos son los más fértiles y profundos dentro de la Cuenca Alta. Esto se debe en gran parte a su procedencia sedimentaria. A pesar de esto, los suelos de la llanura generalmente se encuentran bastante secos en su parte más superficial, debido a las reducidas precipitaciones, irregularmente repartidas a lo largo del año, y pueden presentar problemas por la aparición de acumulaciones de carbonatos en forma de caliches y costras. En el Campo de Montiel encontramos suelos de características similares.

Una descripción más extensa de las características geológicas de la zona puede encontrarse en textos especializados del ITGE o SGOP.

#### ***A.1.2.2. Rasgos climáticos***

El clima de la Cuenca Alta del Guadiana puede calificarse como mediterráneo continental (Cruces y Martínez-Cortina, 2000) con temperaturas extremas que presentan una gran oscilación anual y con precipitaciones medias reducidas, que igualmente fluctúan significativamente durante y entre diferentes años, produciendo la confluencia de ambos factores condiciones de elevada aridez.

Los factores más o menos constantes que imprimen las características climáticas generales de la zona resultan variados (CHG, 1988):

i) La situación geográfica de la región hace que se vea afectada tanto por la acción de las masas de aire subtropical marítimo y continental sahariano como por los frentes de aire frío de procedencia polar marítima o continental, permitiendo variaciones considerables en las características termodinámicas de la zona.

Asimismo, su posición en la zona central de la Península Ibérica le imprime un marcado carácter de continentalidad, como queda reflejado en las amplias variaciones poco amortiguadas que se dan en sus elementos climáticos.

ii) La latitud a la que se encuentra la zona permite que la cantidad de horas de sol de la que disfruta al día sea elevada, lo que unido a una geomorfología poco accidentada

hace que los valores de evaporación sean considerables, estimándose éstos en torno a los 90 hm<sup>3</sup> como valor medio para toda la Cuenca Alta del Guadiana (CHG, 1992).

iii) Aunque el área participa de las características mediterráneas, la influencia dominante es sin duda la Atlántica. Aparecen comportamientos climáticos típicos, derivados de la posición de la península en una zona templada con distintas influencias como pueden ser el cinturón polar de frentes fríos o el Anticiclón de las Azores.

Como resultado de todos estos factores la cuenca se puede englobar como mediterránea seca, teniendo en su parte alta una precipitación media escasa e irregular, con frecuentes años secos, índice de humedad bajo e insolación alta, evaporación significativa y periodo libre de heladas reducido a cuatro meses.

Los factores más relevantes para comprender la influencia climática sobre el tema de estudio son la precipitación, temperatura y evapotranspiración.

La precipitación media anual en la Cuenca Alta queda comprendida entre 350 y 600 mm con un valor medio anual que varía considerablemente según la fuente de referencia. En el Plan Especial del Alto Guadiana - PEAG (CHG, 2005) se estima en 510 mm/año, mientras que según el Plan Hidrológico de cuenca, este valor es de 450 mm; sin embargo, otros estudios sin carácter oficial (Llamas y Martínez-Santos, 2005) lo sitúan en los 415 mm anuales.

Los datos de precipitación media anual para la unidad hidrogeológica de La Mancha Occidental según el Plan Hidrológico de cuenca resultan también variados. Según el informe sobre la Cuenca Alta del Guadiana, vinculado a la implementación de la Directiva Marco del Agua, la precipitación en la zona es de 350 mm/año. Por otro lado, un análisis de la serie histórica de precipitaciones medidas en estaciones de la Llanura Manchega determina este dato en torno a los 400 mm (Cruces y Martínez-Cortina, 2000).

A pesar de las diferencias existentes en los datos, se puede concluir que nos encontramos en una de las regiones más secas de toda la península ibérica. Además, según las conclusiones del informe del antiguo Ministerio de Medio Ambiente “Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático” (MIMAM, 2005), la reducción de la precipitación media en la zona podría llegar a ser de hasta el 14% en el año 2030.

Los datos registrados en la red de estaciones meteorológicas del Servicio de Asesoramiento al Regadío (SIAR) de la Comunidad de Castilla La Mancha muestra como los últimos 10 años (periodo 2000-2009) configuran un periodo de carácter seco en el que la precipitación media se sitúa en torno a los 360 mm/año.

En la figura 1.3 se recoge el valor de precipitación media anual en las estaciones del SIAR, que se encuentran distribuidas siguiendo un patrón de densidad relacionado con la

distribución del regadío en la zona. De esta forma, las estaciones meteorológicas se ubican de forma representativa sobre las zonas de los acuíferos donde el riego se encuentra más extendido, tomando datos de las zonas con mayor interés desde el punto de vista agrario. Como apoyo a estos datos, se incluye el patrón de variación de las precipitaciones dentro de la zona según datos históricos.

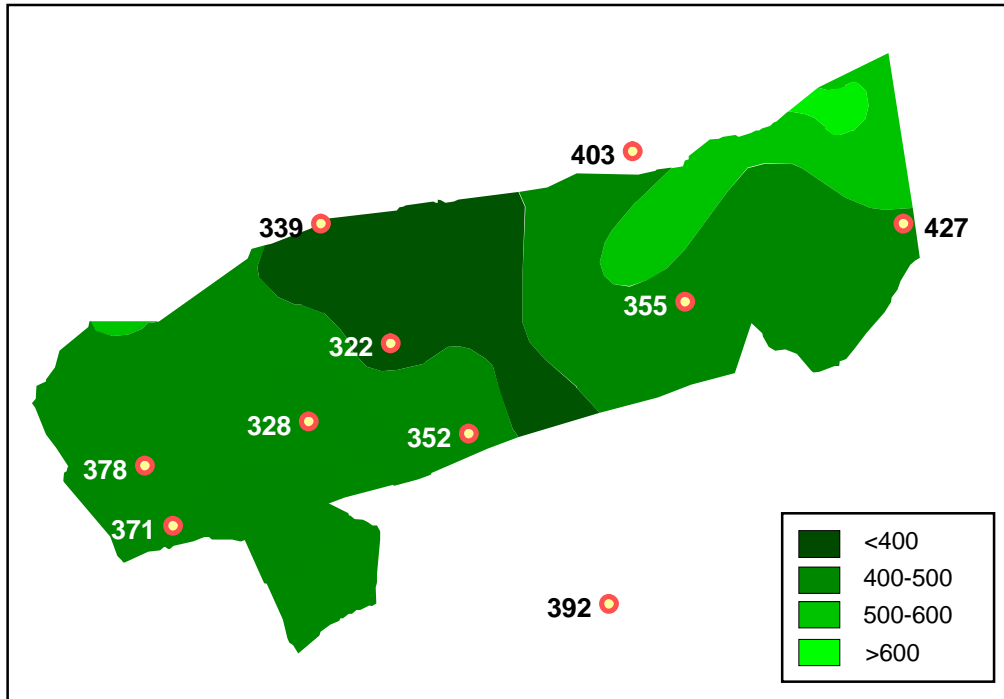


Figura A.3. Precipitación media anual (mm/año) en las estaciones SIAR de la zona de estudio durante el periodo 2000 – 2009 y distribución histórica aproximada de la precipitación media sobre el acuífero de La Mancha Occidental (Fuente: elaboración propia a partir de datos del SIAR, CHG y Fernández, 1991)

La variabilidad existente en el análisis histórico de las precipitaciones medias en la Cuenca Alta (calculadas integrando datos de más de 40 estaciones según el método de los polígonos de Thiessen) muestra variaciones frecuentes en un rango que oscila en torno a un 50% por encima o debajo de la media anual histórica (Cruces y Martínez-Cortina, 2000).

Además, estudios similares realizados para estaciones individuales, han mostrado una mayor variabilidad (Cruces *et al*, 1997) y una elevada frecuencia de precipitaciones intensas localizadas que afectan de manera muy desigual al territorio de referencia.

La observación de los datos históricos permite observar como los periodos secos y húmedos suelen alternarse en la zona y suceden de forma irregular tanto espacial como temporalmente dentro de la Cuenca Alta.

En relación a las temperaturas, destaca la amplitud térmica existente, con inviernos que pueden llegar a ser muy fríos -con temperaturas medias en enero de 5°C- y veranos tórridos donde las temperaturas medias que ascienden a los 25°C (Llamas y Martínez-



Santos, 2005). Con carácter general, las temperaturas medias anuales se sitúan entre los 13 y 14°C.

Tomando en consideración los datos de las estaciones SIAR de los últimos diez años, entre 2000 y 2009, la temperatura media anual en la zona ha sido de 13,9°C. La media de las temperaturas mínimas mensuales baja a 7°C, mientras que la media de las máximas mensuales aumenta hasta los 21°C.

La distribución de la temperatura media anual sobre los acuíferos sobreexplotados se muestra en la Figura A.4.

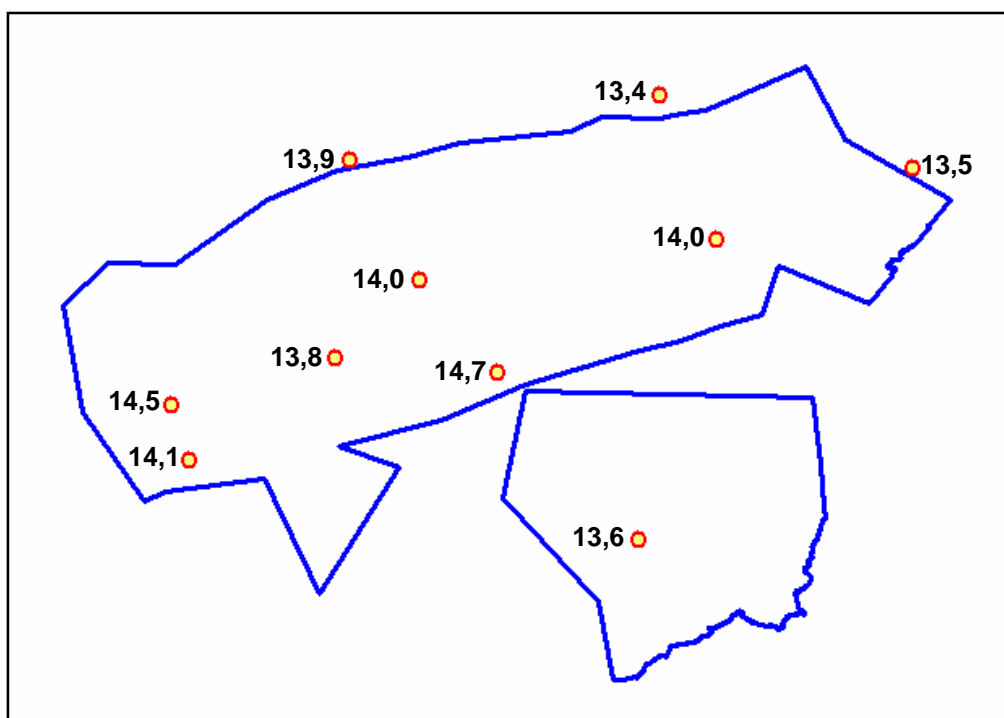


Figura A.4. Temperatura media anual (°C) en las estaciones SIAR de la zona de estudio durante el periodo 2000 – 2009 (Fuente: elaboración propia a partir de datos del SIAR)

La relación entre temperatura y precipitación proporciona información básica para la caracterización del clima de la zona. Este análisis se presenta en la Figura 1.5, donde basándose en datos recogidos desde principio del siglo XX en las Tablas de Daimiel, los autores (Martínez-Santos *et al*) muestran la relación media existente para cada mes del año entre la temperatura y la precipitación media.

Como se ha comentado en el inicio del capítulo, se observa que el área presenta un clima mediterráneo continental, con veranos muy marcados, -calurosos y con fuerte estiaje – y datos de precipitación y temperatura media cercanos entre sí y no alejados de la media total, para los restantes meses del año.

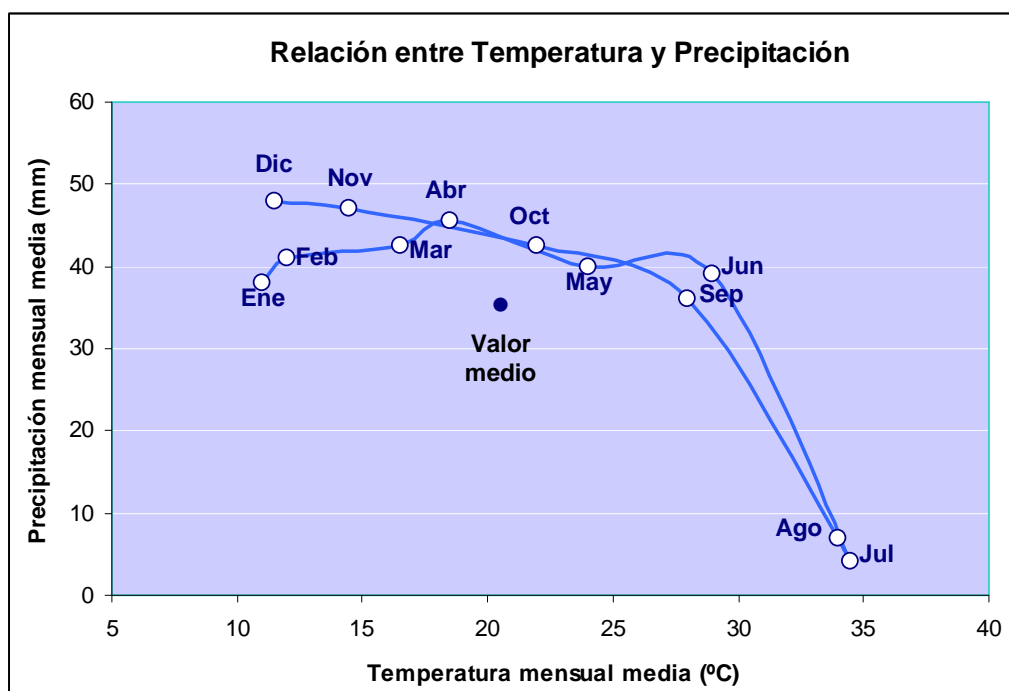


Figura A. 5. Relación entre precipitaciones y temperaturas medias mensuales en las Tablas de Daimiel durante el periodo 1904-2002 (Fuente: adaptado de Martínez-Santos *et al*, 2004)

Los datos medios de evaporación y evapotranspiración presentan diferencias amplias según la fuente consultada y el modelo de cálculo empleado. En el PEAG, la evaporación anual total calculada por el método de Thornwaite se sitúa en los 700 mm/año, aunque según la mayoría de estudios consultados este método tiende a subestimar los valores reales durante los meses de verano, siendo el método de Penman, el que mejor parece acomodarse a las características climáticas de la región. De esta forma, los datos de evapotranspiración potencial estimados mediante este último método se sitúan entre 950 y 1250 mm/año (Llamas y Martínez-Santos, 2005). En este sentido, la Dirección General de Obras Públicas, usando el método de Penman, estimó que la evapotranspiración media de la zona es de 944 mm/año (DGOP, 1982), mientras que estimaciones similares realizadas en la zona experimental de Barrax (situada unos pocos kilómetros al este de la Cuenca Alta y con condiciones climáticas muy similares), para una serie de 15 años, obtuvieron como resultado un dato de evapotranspiración media de 1.242 mm/año. La evaporación media anual en tanque, según datos del embalse de Gasset, es de 1.300 mm al año (DGOP, 1982).

Por otro lado, la evapotranspiración real que se produce en el territorio se estima entre 350 y 400 mm anuales (Martínez Cortina, 2002). Además, dada la extensión de las zonas húmedas de la Cuenca Alta, las pérdidas de recursos por la evaporación directa resulta elevada.

A pesar de la disparidad de los datos, se pueden establecer las conclusiones más importantes relacionadas con la caracterización de la zona:

- Dada la elevada evaporación media, considerando que en las zonas húmedas la evapotranspiración puede exceder notablemente la evaporación en lámina libre (Calder, 1976) y teniendo en cuenta la amplia superficie que al menos potencialmente ocupan las zonas húmedas en la Cuenca Alta, la evaporación y evapotranspiración en estas áreas es potencialmente muy elevada.
- Tomando en consideración la horquilla de datos existente, los índices de humedad fruto del ratio entre precipitación y evapotranspiración media indican en todos los casos la existencia de un régimen semiárido.
- La época del año que se dedica mayormente a riegos, la que va desde mayo a octubre, se corresponde con las épocas de mayor déficit hídrico estructural, es decir con el período de mayor sequía de todo el año, en el que las precipitaciones se reducen y la evapotranspiración aumenta.

#### ***A.1.2.3. Hidrología superficial***

La red hidrográfica de la Cuenca Alta puede dividirse en dos grupos con características hidrológicas muy distintas, según se trate de los afluentes de la margen derecha o izquierda del Guadiana, como consecuencia de las diversas condiciones geológicas y topográficas de sus cuencas vertientes.

Los principales afluentes de la margen derecha, Gigüela<sup>2</sup> y Záncara, son ríos de relativo largo recorrido. Sus cuencas tienen un relieve poco acentuado, y presentan un régimen con aguas altas en invierno - primavera y unos estiajes muy marcados (CHG, 1988). En su discurrir por la planicie manchega, la escasa pendiente de sus lechos y los drenajes al acuífero dan origen al encharcamiento de amplias extensiones, entre las que hay que destacar las Tablas de Daimiel, entre otros muchos humedales y lagunas.

El río Záncara discurre mayoritariamente en dirección norte-sur desde su nacimiento en la Serranía de Cuenca, hasta que después de recibir las aguas del río Rus, pasa a dirigirse hacia el oeste. Tras recorrer una distancia considerable sobre el acuífero de La Mancha Occidental, en su parte norte, recibe por su izquierda a su afluente Córcoles ya en el Campo de San Juan para, pocos kilómetros después, unirse con el río Gigüela en la zona conocida como Junta de los Ríos.

Durante su recorrido por el sistema acuífero, el Záncara cruza terrenos calizos de elevada permeabilidad, por lo que en régimen natural mantenía una importante relación con el sistema acuífero subyacente, realizando aportaciones desde el subalveo del cauce en algunas zonas y sirviendo como punto de drenaje en otras. Este equilibrio no se mantenía estable en el tiempo sino que se trataba de un proceso dinámico dependiente

---

<sup>2</sup> En la actualidad, la documentación oficial suele denominar a este río Cigüela, si bien su nombre primigenio y más comúnmente utilizado en la zona es el de Gigüela.

de la época del año así como de la climatología y nivel de precipitaciones del año en curso.

El río Gigüela nace igualmente en la serranía conquense, cerca del propio Záncara, aunque su recorrido tiene una dirección principal Noreste - Suroeste. Su principal afluente es el río Riansares. Tras recoger las aguas del Záncara, recibe también al Amarguillo y cruza la parte noroeste del acuífero de La Mancha Occidental hasta desbordarse en las Tablas de Daimiel donde junta sus aguas con las del río Guadiana.

Durante su recorrido de algo menos de 200 kilómetros cruza terrenos de diferentes características calizas y evaporíticas, lo que produce que sus aguas tengan un considerable contenido disuelto de sales y sulfatos.

Dentro de la Cuenca Alta, el Gigüela atraviesa terrenos de pendiente muy reducida, lo que ocasiona la formación de numerosos humedales asociados al río, por encharcamiento. Estas zonas húmedas se originan a causa del desbordamiento, comunicación con el acuífero fluvial o por drenaje de las aguas del río.

El último afluente importante por la parte derecha dentro de la parte más oriental de la Cuenca Alta y aunque ya fuera de la zona de la llanura Manchega es el río Bañuelos, asociado con una de las cuencas más accidentadas de la región, lo que conlleva una red de drenaje muy irregular.

Los afluentes de la margen izquierda de la Llanura Manchega, Jabalón, Azuer y Pinilla, presentan dos tramos netamente diferenciados; uno alto, de relieve algo acusado y afloramientos calizos en el que se produce drenaje de aguas subterráneas, y otro bajo desarrollado en la Llanura Manchega, en el que se originan pérdidas de caudal por evaporación y sobre todo por infiltración al sistema acuífero de la Llanura (Cruces y Martínez-Cortina, 2000).

El río Pinilla tiene su nacimiento en un conjunto de manantiales de formación kárstica situados en la planicie del Campo de Montiel. Tras discurrir cerca de 30 kilómetros por la llanura sobre materiales calizos llega a la Laguna Blanca, que es la inicial y situada a mayor altitud del conjunto lagunar de Ruidera.

En este momento, el Pinilla se remansa y convierte en un sistema fluvio-lacustre que recibe abundantes aportaciones de manantiales que afloran aguas procedentes del acuífero del Campo de Montiel, ya que las Lagunas de Ruidera se convierten en el punto de drenaje del acuífero. Igualmente recoge aguas superficiales provenientes de los arroyos del Sabinar, de las Caleruelas, de la Nava, de Alarconcillo y Berbián. El complejo lagunar de Ruidera es sin duda uno de los elementos más singulares que aparecen en este territorio.

Desde el año 1956, estas aguas se encuentran reguladas por el embalse de Peñarroya, situado en el punto final de las lagunas, y que atiende a la denominada Zona Regable de Peñarroya. Antes de la construcción de la presa, el Pinilla entraba con un caudal

importante en la Llanura Manchega, que acababa infiltrándose en los terrenos porosos sedimentarios tras recorrer varios kilómetros, existiendo incluso antecedentes no muy lejanos de graves inundaciones producidas en los núcleos de Argamasilla de Alba y Tomelloso.

El Pinilla canaliza el drenaje superficial de la penillanura del Campo de Montiel, situada a una mayor altitud, hacia la llanura de La Mancha, donde estas aguas acaban rellenando el sistema acuífero de La Mancha Occidental.

El río Azuer también nace dentro del Campo de Montiel, en una zona de manantiales cercana a Villahermosa. Su cauce drena las aguas de la zona hacia el oeste, teniendo como afluentes principales a los ríos Cañamares y Tortillo. Entra en el sistema acuífero manchego a través del Puerto de Vallehermoso, donde se encuentra regulado. Recorre los términos municipales de Manzanares y Daimiel hasta llegar al río Guadiana pocos kilómetros después de su nacimiento en los manantiales de los Ojos.

El río Jabalón es el único de los grandes ríos de la Cuenca Alta del Guadiana que no presenta una aportación directa a la unidad de La Mancha Occidental. Su cauce se sitúa paralelo al del Guadiana al sur de la Llanura Manchega, cruzando cerca de su borde meridional en el término de Valdepeñas. Se convierte en afluente del Guadiana en el límite occidental de la Cuenca Alta.

Por último, tenemos el río Guadiana, que se convierte en el directriz y principal de la cuenca. La geografía tradicional ha venido postulando que el río Guadiana presenta dos tramos: un primer nivel coincidente con el Pinilla hasta su infiltración en la llanura, donde se suponía su desaparición para seguir su recorrido por el subsuelo (segundo tramo) hasta su afloramiento en los Ojos, desde donde se considera el inicio del tercer tramo del río.

En la actualidad, cada vez más autores (Álvarez-Cobelas *et al*, 2009) defienden que el nacimiento de Guadiana como río se sitúa en los manantiales de los Ojos, donde en régimen natural se produce la surgencia de las aguas procedentes del acuífero. Estas aguas son de muy diverso origen, tanto desde el punto de vista geográfico como de tipología de entrada al sistema acuífero (infiltración de precipitaciones, infiltración de cauces superficiales o aportes laterales de aguas subterráneas desde otros acuíferos). Este modelo es el asumido dentro del presente trabajo, considerando como ríos independientes el Pinilla (o Guadiana Alto) y el Guadiana.

Así, el río Guadiana nace en los Ojos, recoge las aportaciones del Azuer, se desborda en las Tablas de Daimiel, donde se une al Gigüela y sale del acuífero de La Mancha Occidental por el oeste, concentrando la salida natural de recursos hídricos del sistema acuífero.

La distribución de las redes hidrográficas dentro de la Cuenca Alta, así como dentro de la zona de estudio, se resume en la Tabla A.3 y la Figura A.6.

Tabla A.3.- Características de los principales ríos y subcuencas de la región. (Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía de la CHG)

Nombre del Río	Cuenca Alta del Guadiana		Acuíferos sobreexplotados	
	Longitud (km)	Extensión subcuenca (km <sup>2</sup> )	Longitud (km)	Extensión subcuenca (km <sup>2</sup> )
1.- Guadiana Alto	68	964,7	68	949,2
2.- Guadiana	78	3.849,3	33	2.522,5
2.1.- Gígüela	190	4.744,7	56	623,4
2.1.1.- Záncara	172	4.932,1	91	1.875,2
2.2.- Azuer	120	1.327,5	86	726,2
2.3.- Jabalón	156	2.409,1	5	101,6
2.4.- Bañuelos	41	674,0	0	0

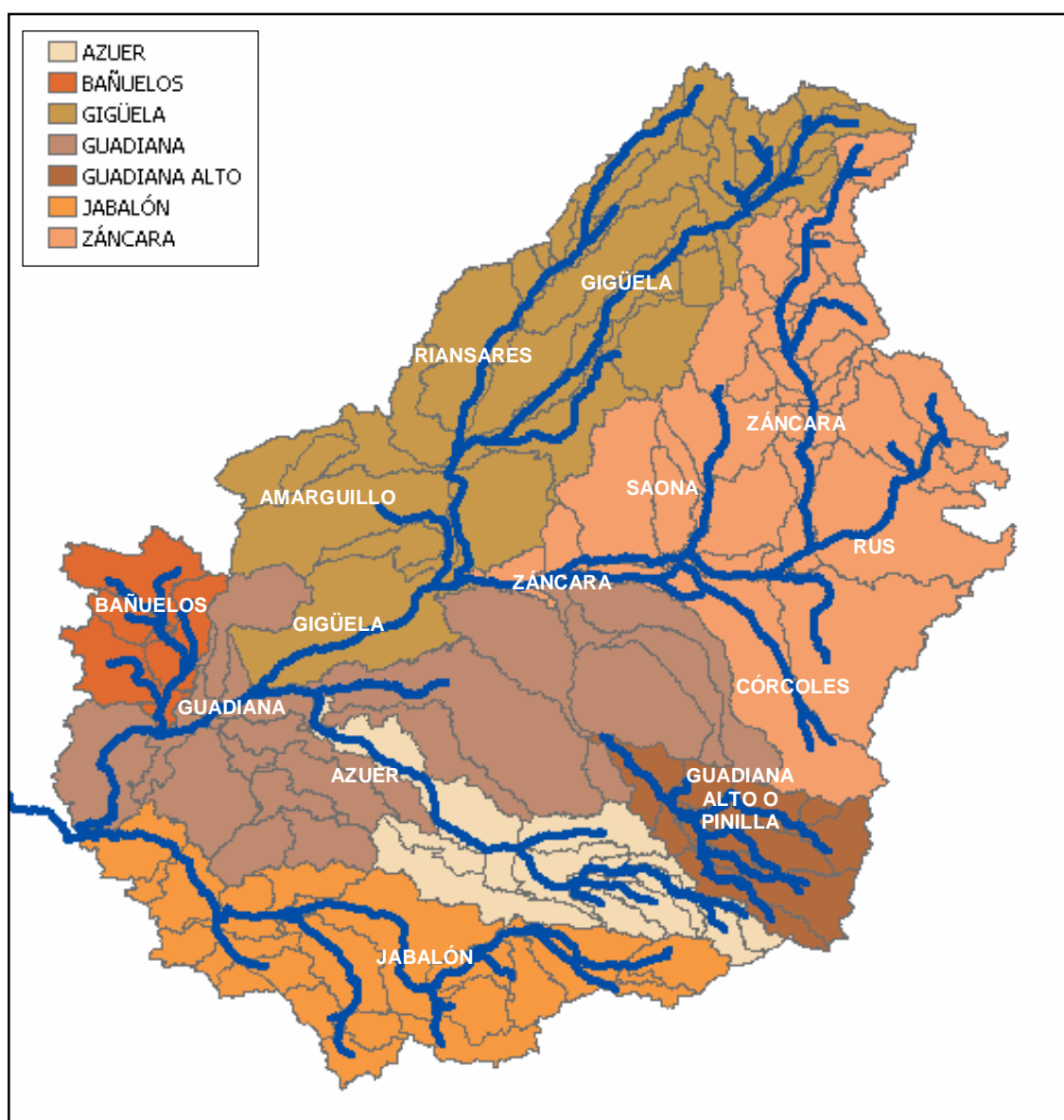


Figura A.6.- Distribución de los principales ríos y subcuencas dentro de la Cuenca Alta del Guadiana (Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía de la CHG)

La Cuenca Alta del Guadiana se caracteriza por la existencia de numerosas tablas fluviales y lagunas de diversos orígenes alimentadas unas veces por escorrentías y en otros casos por el afloramiento de aguas subterráneas, que dan lugar al único conjunto de humedales con carácter regional en la península ibérica: la denominada "Mancha Húmeda" (Dantín, 1932) que se extiende por gran parte de su superficie.

La Mancha Húmeda posee la distinción de Reserva de la Biosfera por la UNESCO, lo que reconoce la elevada diversidad, importancia ecológica y valor cultural del conjunto de humedales que la forman. La variedad de humedales existentes se explica por varios factores (Florín, 2001): la existencia de una llanura de gran extensión, la presencia de influencias litológicas diferenciadas; silíceas (Montes de Toledo), caliza (Serranía de Cuenca y Sierra de Altomira) y arcillosa (llanura manchega), y por la singular relación existente entre territorio y aguas subterráneas.

Las tablas son consideradas como los humedales más característicos de la región Manchega. Se tratan de desbordamientos fluviales que se producen debido a la escasa pendiente del terreno y a la poca capacidad erosiva de las aguas superficiales sobre el cauce de los ríos. Entre las lagunas encontramos casos gran variedad, desde las que presentan cubetas bien definidas y aportes importantes de aguas subterráneas, hasta las que tienen un carácter más endorreico y un régimen de inundación más impredecible, derivado de las características anuales de las precipitaciones.

Tanto las tablas como las lagunas manchegas están ligadas a un régimen natural caracterizado por una elevada variabilidad climática, por lo que sufren cambios muy importantes en su nivel freático y superficie encharcada según sean las condiciones climáticas estacionales y anuales.

Estas zonas se convierten en un rosario de enclaves con características totalmente diferenciadas de la zona esteparia en la que se encuentran, por lo que sirven como refugio para un gran número de especies tanto animales como vegetales, presentando una alta biodiversidad en sus ecosistemas. En particular resultan de especial importancia para las aves acuáticas que utilizan estas zonas húmedas como lugar de descanso en sus desplazamientos migratorios, como lugar de invernada o como zona de cría.

#### ***A.1.2.4. Hidrología subterránea***

La gestión de la hidrología subterránea en España se basa en el uso de unidades hidrogeológicas, que se definen como figuras legales que agrupan uno o más acuíferos con objeto de facilitar tareas administrativas y de planificación (IGME, 1999).

La descripción detallada de las características de las unidades hidrogeológicas que se ubican dentro de la Cuenca Alta resulta fundamental dentro del marco del estudio. Estos sistemas de acuíferos delimitan las unidades de trabajo para la posterior estimación de la distribución de las superficies de cultivos en regadío a partir de aguas subterráneas.



En la Cuenca Alta del río Guadiana encontramos una gran cantidad de superficie con características potenciales de acuífero. El IGME ha dividido esta superficie en las siguientes unidades hidrogeológicas (U.H.):

- U.H. 04.01: Sierra de Altomira
- U.H. 04.02: Lillo - Quintanar
- U.H. 04.03: Consuegra - Villacañas
- U.H. 04.04: Mancha Occidental
- U.H. 04.05: Ciudad Real
- U.H. 04.06: Campo de Montiel (Guadalquivir 05.99)

Esta división se ha efectuado recientemente por lo que resulta frecuente seguir encontrando aún las denominaciones anteriores, con la siguiente correspondencia:

Tabla A.4. Correspondencia entre denominación previa y actual de las unidades hidrogeológicas

Código previo	Denominación previa	Código actual
Acuífero 19	Sierra de altomira	U.H. 04.01
Acuífero 20	Mancha de Toledo	U.H. 04.02 y U.H. 04.03
Acuífero 22	Cuenca del río Bullaque	U.H. 04.07
Acuífero 23	Llanura Occidental Manchega	U.H. 04.04
Acuífero 24	Campo de Montiel	U.H. 04.06

Estas unidades hidrogeológicas se delimitan mediante una línea poligonal referida a vértices de la red geodésica nacional o a otros puntos del territorio que permiten su identificación de manera unívoca y sin ambigüedad.

Dentro de la Figura A.7, se representan (en color amarillo) las delimitaciones administrativas de las distintas unidades hidrogeológicas, mientras que en color azul aparecen los perímetros de protección asociados a unidades declaradas sobreexplotadas, en los que rigen condiciones especiales de gestión y explotación impuestas anualmente por la Confederación Hidrográfica.

En el caso de la unidad de La Mancha Occidental, este perímetro de protección coincide casi íntegramente con los límites de la propia unidad, mientras que en el caso del Campo de Montiel encontramos diferencias. Además se representa el perímetro de especial protección asociado a la unidad de la Sierra de Altomira.

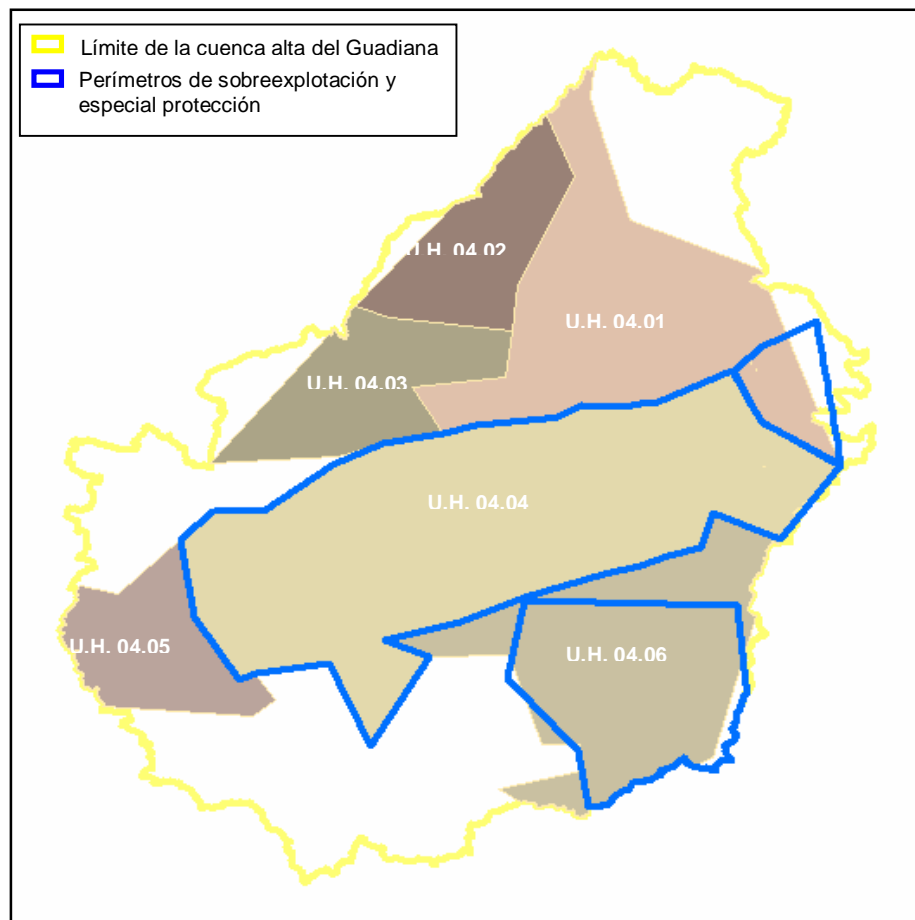


Figura A. 7.- Unidades hidrogeológicas ubicadas dentro de la Cuenca Alta del Guadiana

Todas estas unidades forman en su conjunto un complejo sistema hidrogeológico en el que el sistema 04.04, que aparece íntimamente relacionado con los sistemas 04.01 y 04.06, constituye el centro y unidad más importante. Dentro de este sistema encontramos una gran variación en la estructura, origen y funcionamiento de los distintos acuíferos, y también en la calidad de las aguas subterráneas, debido a la diversificación de las fuentes de contaminación y a los diferentes grados de vulnerabilidad de los acuíferos frente a ellas. Las características de cada uno de las unidades hidrogeológicas de interés se van introduciendo en los siguientes puntos.

#### ***Sistema acuífero 04.01: "Sierra de Altomira"***

Comprende unos 2.700 km<sup>2</sup> al NE de la Cuenca Alta del Guadiana. Se trata de una extensa planicie con suaves alineaciones montañosas en dirección N-S, en la que nacen los ríos Riansares, Gigüela, Záncara y Rus. La actividad humana principal es la agricultura de secano.

El clima se puede considerar como templado - cálido, y la precipitación media anual es del orden de 500 mm, con un coeficiente de irregularidad anual de 8 (CHG, 1988).

Es una unidad fundamentalmente caliza y dolomítica aflorando las rocas en algunas zonas montañosas. El resto del área está recubierta por formaciones detríticas de escaso interés hidrogeológico debido a su baja permeabilidad.

Los recursos globales procedentes en su totalidad de las precipitaciones, se sitúan en torno a los 280 hm<sup>3</sup>/año. De esta cantidad pasan a convertirse en aguas subterráneas almacenadas en las zonas calizas entre unos 120 y 180 hm<sup>3</sup>/año (CHG, 1988), situándose la cifra media en unos 135 hm<sup>3</sup> anuales (CHG, 2008). Este margen se debe a los topes posibles de recarga de las zonas de recubrimiento de los materiales más antiguos. Su alta productividad unida a su adecuada distribución espacial y a la buena calidad del agua hacen esta zona del acuífero propicia para su explotación.

Las salidas de aguas subterráneas se realizan a través del drenaje de algunos ríos y manantiales de la zona, como recarga de la unidad 04.04, a la cuenca del Tajo y principalmente a la del Júcar.

En relación a la calidad de sus aguas subterráneas tiene el inconveniente de ser surcada de norte a sur por el río Záncara el cual presenta una severa contaminación.

Dentro de la unidad, las mejores aguas son las contenidas en acuíferos procedentes del Secundario, aunque éstas cuentan con bastante contenido en sales (cálcicas y carbonatos) y una pequeña cantidad de sulfatos y cloruros, y en algunas ocasiones nitratos en demasiada cantidad. (CHG, 2005)

#### ***Sistema acuífero 04.02: "Lillo – Quintanar"***

Se sitúa en una amplia llanura con suaves ondulaciones interrumpida por las estribaciones de los Montes de Toledo y atravesada por los ríos Gigüela, Riansares y Amarguillo. Ocupa dentro de la cuenca del Guadiana unos 1.000 km<sup>2</sup> en la zona NO de la región.

La zona presenta un clima templado - cálido, con una pluviometría media en torno a los 425 mm anuales (CHG, 1992).

Geológicamente, se ubica sobre un substrato paleozoico donde existen depósitos de sedimentos detríticos del Mesozoico y del Terciario, coronados en algunos puntos por calizas también del Terciario. El acuífero de esta unidad tiene una potencialidad reducida, pero resulta de gran importancia al constituir prácticamente la única fuente de recursos hídricos de la zona. Aparecen acuíferos formados por calizas o por materiales detríticos, que se encuentran conectados entre sí extendiéndose unos u otros prácticamente por toda la zona, y acuíferos colgados formados por calizas terciarias (CHG, 1988).

En esta zona el régimen de los ríos es muy irregular y está íntimamente relacionado con las precipitaciones.

Los recursos de aguas subterráneas se han evaluado en unos 27 hm<sup>3</sup>/año, procedentes de la infiltración directa del agua de las lluvias (CHG, 2005). Estas aguas tienen

diferentes salidas del sistema. Se consumen en parte para abastecimiento y regadíos, se evaporan a través de las diferentes zonas encharcadas que aparecen por el afloramiento de las aguas del subsuelo o son drenadas por los ríos que la cruzan.

Algunos acuíferos, como los procedentes del periodo Cámbrico, presentan muy buena calidad en sus aguas, aunque por regla general encontramos otros acuíferos de muy mala calidad con aguas químicamente no potables, lo que provoca problemas de abastecimiento en varios pueblos (CHG, 1992).

#### ***Sistema acuífero 04.03: "Consuegra - Villacañas"***

Se ubica al suroeste de la unidad anterior, ocupando la misma llanura de sedimentación y compartiendo el territorio sobre el que se sitúa, las mismas características socioeconómicas, geográficas y climáticas que la unidad 04.02.

Abarca algo menos de 1.200 km<sup>2</sup> en la zona noroeste de la Cuenca Alta, con unos recursos potenciales cercanos a los 15 hm<sup>3</sup>/año (CHG, 2005).

La razón que explica su diferenciación del sistema de Lillo - Quintanar es su distinto origen geológico lo que le confiere unas características de funcionamiento propias al ser de procedencia sedimentaria.

El sistema 04.03 está formado por acuíferos permeables por porosidad, que en su práctica totalidad se instalan en materiales terciarios y plio-cuaternarios o cuaternarios. Presenta frecuentes cambios de facies y una elevada diversidad litológica que condicionan en gran medida su comportamiento hidráulico, a veces poco conocido. Está constituido por materiales detríticos (arcillas, arenas, gravas, conglomerados, limos). Desde el punto de vista del balance de recursos hídricos, se ha venido considerando como una unidad excedentaria (CHG, 1994), aunque esta situación ha podido cambiar en los últimos años por el aumento de la presión agrícola (CHG, 2008).

La recarga se produce por infiltración de agua de lluvia y por retorno de riegos con aguas superficiales, con ascensos de nivel de hasta dos metros en época de estiaje. El drenaje se produce al Guadiana y afluentes.

Los caudales de explotación suelen ser reducidos (inferiores a 10 l/s) y la calidad del agua suele estar condicionada en buena medida por los efectos de una contaminación nitrogenada (abonos y ganadería) que provoca la existencia frecuente de aguas sanitariamente no permisibles (CHG, 1994), aunque en general, las aguas de esta unidad son aptas para todo uso.

#### ***Sistema acuífero 04.04: "Mancha Occidental"***

Se trata no solamente del acuífero más importante dentro del área de la Cuenca Alta del Guadiana, sino además de uno de los más significativos de toda la península ibérica. Se extiende sobre la práctica totalidad de la llanura occidental de la Mancha, ocupando una superficie aproximada de 5.120 km<sup>2</sup> que coincide con la zona donde se concentra la

mayor parte tanto de la población como de las actividades económicas de la región. Se distribuye en un 80% en la provincia de Ciudad Real y el resto por las de Albacete y Cuenca, ocupando una llanura de pendiente muy poco acentuada. Los afluentes del norte, con regímenes muy irregulares, son los ríos Gigüela, el cual en su unión con el Guadiana forma el humedal de las Tablas de Daimiel, y el Záncara, afluente a su vez del Gigüela. Los afluentes del sur, cuyos caudales se mantienen hasta el límite de la llanura son el Azuer y el Pinilla.

La actividad económica principal de la región radica en la agricultura, tanto de secano como de regadío, que a expensas de las aguas subterráneas ha alcanzado un enorme desarrollo con grandes ritmos de crecimiento en los últimos años. La actividad industrial, poco desarrollada, tiene por lo general una relación directa con la agrícola.

Las precipitaciones medias que se recogen en el área se sitúan en el intervalo de los 400 - 425 mm anuales (CHG, 1992), presentando un clima mediterráneo templado.

El sistema acuífero está formado fundamentalmente por dos unidades hidrogeológicas, entre las se sitúa una unidad intermedia de materiales sedimentarios del Mioceno Inferior que actúa como acuitardo (SGOP, 1988)

#### a) Unidad hidrogeológica superior

Formada por niveles con características hidrogeológicas muy diferentes, calizas y margas del Mioceno Superior y materiales detríticos del Pliocuatnario y Cuaternario, se extiende por la práctica totalidad de la llanura. Presenta un espesor medio de 35 metros, con potencias máximas de hasta 200 metros en la zona central (Cruces y Martínez Cortina, 2000). Los parámetros hidráulicos varían según la naturaleza de los materiales. Para los niveles detríticos del Pliocuatnario y Cuaternario, la transmisividad oscila entre 0 y 500 m<sup>2</sup>/día (CHG, 1988), y el coeficiente de almacenamiento puede cifrarse en un 1,5% (Niñerola *et al*, 1976). En los niveles calcáreos del Mioceno Superior, que suponen el acuífero más importante de la depresión, la transmisividad varía entre 50 y 20.000 m<sup>2</sup>/día y el coeficiente de almacenamiento se ha estimado entre un 1% y un 2%. (IGME, 1979). Las reservas del acuífero presentan una capacidad útil del orden de 11.000 hm<sup>3</sup> (CHG, 1988) y desde este acuífero se estima que se producen en torno al 80% de las extracciones de aguas subterráneas (Cruces y Martínez Cortina, 2000).

#### b) Unidad hidrogeológica inferior

Está constituida por tres niveles acuíferos distintos, calizas del Cretácico Superior, calizas del Jurásico medio y dolomías del Jurásico inferior, separados entre si por capas menos permeables. Se extiende por unos 3.600 km<sup>2</sup> en la parte central y oriental del zócalo y con continuidad geológica en los acuíferos de los Campos de Montiel y Sierra de Altomira, con los que está conectado hidráulicamente.

La unidad no tiene espesores constantes, ya que los materiales siguen la tendencia de la cuenca sedimentaria mesozoica, pero en general existe un aumento de potencia hacia el

este. Los parámetros hidráulicos del conjunto se han estimado entre 200 y 600 m<sup>2</sup>/día para la transmisividad y valores de  $4 \cdot 10^{-3}$  para el coeficiente de almacenamiento. (IGME, 1979). Las reservas de este acuífero se estiman en 1.500 hm<sup>3</sup>.

Tabla A.5. Características del acuífero de La Mancha Occidental (Martínez Cortina, 2002)

UH 04.04	Geología	Materiales	Espesor (m)	Transmisividad (m <sup>2</sup> /día)	Coeficiente almacenamiento
Acuífero superior	Plioceno / Cuaternario	Detríticos	Hasta 60	< 500	0,01 – 0,1
	Mioceno superior	Calizas y margas	Hasta 200	50 - 20.000	0,015 – 0,05
Acuitardo intermedio					
Acuífero inferior	Cretácico superior	Calizas	25	200 -5.000	$10^{-3} - 10^{-4}$
	Jurásico	Calizas	60	6.000	$10^{-3} - 10^{-4}$
	Jurásico inferior	Dolomías	60	500 – 5.000	$10^{-3} - 10^{-4}$

El funcionamiento hidráulico del sistema es bastante complejo. En líneas generales, la dirección del flujo del agua es de este a oeste, aunque existen zonas con ligeras variaciones: de noreste a suroeste en el área del Gigüela - Záncara y de sureste a noroeste al sur de Manzanares (CHG, 1992). Evidentemente hay variaciones locales cuando se produce un cono importante de bombeo.

La recarga del acuífero se produce por:

- Infiltración del agua de los ríos: al llegar a la Llanura, provenientes de los sistemas vecinos; los ríos que se infiltran total o parcialmente son: el Córcoles, el Guadiana (sobrantes del embalse de Peñarroya) y el Azuer, y en menor cuantía el Záncara y el Gigüela.
- Entrada del agua de lluvia caída directamente sobre la zona. La recarga por infiltración se produce de forma bastante irregular, siendo prácticamente nula en aquellos años en que la precipitación es inferior a 300 mm; superior a 50 mm, cuando la precipitación supera los 450 mm y variable en los años de precipitaciones intermedias, dependiendo de la distribución de las lluvias (DGOP, 1982).
- Infiltración de los excedentes de riego, que representan el 10% del agua utilizada en regadío por aspersión y el 25% del regadío a manto aproximadamente (DGOP, 1982).
- Infiltración de los vertidos de las poblaciones.
- Aportaciones de los acuíferos de la Sierra de Altomira y del Campo de Montiel, bien lateralmente, bien en profundidad en el sector Oriental de la llanura. El

acuífero del Campo de Montiel con 60 km de contacto, una transmisividad media de  $500 \text{ m}^2/\text{día}$  y un gradiente de  $1/200$ , aporta un volumen de agua que se estima en  $50 \text{ hm}^3$ . Para el acuífero de la Sierra de Altomira, con parámetros mucho menores, se considera una aportación de  $10 \text{ hm}^3$ . (Llamas y Martínez Santos, 2005).

La descarga del acuífero superior se produce por:

- Las extracciones realizadas por los pozos que lo explotan para regadío, y para abastecimientos humanos e industriales, aunque estos usos son de mucha menor cuantía.
- Drenaje del río Guadiana.
- En las zonas donde el nivel se encuentre cercano a la superficie topográfica (casi ninguna en la actualidad) se produce evapotranspiración directa desde las zonas húmedas sobre el acuífero.

Los recursos medios renovables de agua subterránea de la zona se han evaluado en cifras variables; entre  $260$  y  $300 \text{ hm}^3/\text{año}$  en régimen natural (Martínez Cortina, 2002), hasta un valor medio de unos  $340 \text{ hm}^3/\text{año}$  (CHG, 1988). La mayor parte de las aguas de la Llanura Manchega son de buena calidad, tanto desde el punto de vista del abastecimiento como del regadío. Solamente las zonas de influencia de los ríos Záncara y Gigüela, en los bordes del Norte y el Oeste del sistema, presentan calidad deficiente debido a la alta concentración de iones que portan estos ríos, a lo que se une la condición evaporítica de los materiales que forman estas zonas.

Es importante considerar la interdependencia existente entre las aguas subterráneas y superficiales y la regulación que el embalse subterráneo ejerce sobre toda la cuenca del Guadiana, río que resulta del drenaje natural del conjunto formado por el sistema acuífero 04.04 y los otros sistemas que interactúan con éste. En los últimos veinte años, debido a la alta explotación del acuífero se han anulado todas las salidas laterales del sistema, con repercusiones muy negativas tanto sobre el caudal del río como en el mantenimiento de las zonas encharcadas y de las explotaciones en las zonas periféricas del acuífero. Por este motivo en la actualidad este acuífero se encuentra declarado como sobreexplotado.

#### ***Sistema acuífero 04.05: “Ciudad Real”***

Comprende unos  $925 \text{ km}^2$  al oeste de la Cuenca Alta, en las cercanías de Ciudad Real. En relación con las unidades que lo rodean, ocupa un segundo lugar en la cuenca tanto por su potencialidad en recursos como por el grado de utilización de los mismos, que se cuantifican en  $14 \text{ hm}^3/\text{año}$  (CHG, 2008).



La edad de formación de los acuíferos que componen la unidad se remonta al terciario y pliocuaternario. La zona resulta permeable por procesos de fisuración y karstificación en las calizas. Su salinidad alcanza valores máximos de 2.500 ppm.

Se comportan como acuíferos confinados o semiconfinados en caso de recubrimiento por materiales detríticos terciados. Algunas zonas calizas funcionan en régimen libre, en conexión hidráulica con los ríos.

La recarga en este conjunto de acuíferos tiene lugar por infiltración de agua de lluvia, infiltración de excedentes de riego, recarga lateral e infiltración desde los cauces de los ríos en situación de influencia; la descarga se produce por drenaje a ríos y lagunas, evaporación en zonas encharcadas y extracciones por bombeo.

La unidad 04.05 se caracteriza por presentar una facies sulfatada cálcica. Los usos principales de los recursos subterráneos son la agricultura y el abastecimiento. Aparecen focos de contaminación de origen agrícola (contaminación por nitratos), urbano e industrial (debido al vertido de almazaras y alcoholeras).

#### ***Sistema acuífero 04.06: “Campo de Montiel”***

Se extiende por las provincias de Ciudad Real y Albacete, ocupando en torno a 2.450 km<sup>2</sup>. El Campo de Montiel es una extensa meseta en la que tienen sus nacimientos los ríos Guadiana Alto - Pinilla, Azuer y Córcoles, precisamente como drenaje natural de los acuíferos que forman el sistema. Presenta un clima mediterráneo continentalizado, con una precipitación media anual sobre los 460 mm (CHG, 1988).

Se puede considerar la existencia de un único acuífero en el Campo de Montiel, que se extiende sobre casi su totalidad, compuesto por una serie de calizas dolomíticas y margocalizas que se asientan sobre un substrato arcilloso aflorante que impone unas características estructurales determinantes para el funcionamiento del sistema (CHG, 1992).

Geológicamente, se compone de un zócalo paleozoico sobre el que aparecen dos unidades sedimentadas mesozoicas. La capa sedimentaria inferior se compone de materiales triásicos en especial arcillas y margas yesíferas, de carácter impermeable. Sobre ella se asienta una capa carbonatada, de origen calizo, que permite la existencia de un importante acuífero en la zona (González Martín *et al*, 1987).

Los recursos totales procedentes de la precipitación son del orden de 210 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales unos 135 hm<sup>3</sup> se infiltran y pasan a ser aguas subterráneas (CHG, 1988). Estas aguas salen del sistema a través del drenaje de los ríos, que suelen tener un caudal bastante constante, y abasteciendo subterráneamente a los acuíferos del sistema 04.04. Así pues, la relevancia de la unidad 04.06 no se basa tanto en el aprovechamiento de sus recursos en las zonas que sobre él se asientan, sino por su papel de área de recarga del acuífero de la Llanura Manchega y de regulación del mismo.

Las aguas pertenecientes a este sistema se encuentran dentro de los límites asumibles para los parámetros a determinar, de lo que se deduce la buena calidad de las mismas (CHG, 1992).

El considerable incremento de las extracciones de agua para el riego que tuvo lugar durante las décadas de los 70 y 80, provocó unos descensos bastante considerables de los niveles freáticos de la zona, lo que ha afectado sensiblemente a las Lagunas de Ruidera. Este hecho, unido a la necesidad de conseguir una correcta gestión de los recursos hídricos del área que ocupa el acuífero así como del conjunto de los recursos hídricos de la región manchega, ha propiciado la declaración del mismo como acuífero sobreexplotado.

En la Tabla A.6 se resumen las principales características de los sistemas acuíferos delimitados dentro de la Cuenca Alta del Guadiana.

Tabla A.6. Características de las Unidades Hidrogeológicas de la Cuenca Alta del Guadiana. (Fuente: Modificado a partir de datos de CHG)

Unidad Hidrogeológica	Extensión (km <sup>2</sup> )	Edad	Balance estimado (hm <sup>3</sup> /año)	
			Entradas	Salidas
U.H. 04.01	2.679	Jurásico -Cretácico – Terciario	135	135
U.H. 04.02	997	Terciario	27	27
U.H. 04.03	1.163	Terciario -Cuaternario	17	20
U.H. 04.04	5.123	Mesozoico -Terciario – Pliocuatnario	[230-530]	[300-440]
U.H. 04.05	926	Terciario – Pliocuatnario	17	18
U.H. 04.06	2.453	Jurásico -Cretácico	135	135

A pesar de que las unidades hidrogeológicas sean las unidades de gestión empleadas en la actualidad, la Directiva Marco del Agua (DMA - Directiva 2000/60, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas) introduce una unidad diferente de gestión denominada “masa de agua subterránea”. La definición de esta figura, basada en la definición previa que la propia Directiva hace de la figura de “acuífero”, se encuentra en el Artículo 2, de la propia DMA:

“11) <<acuífero>>: una o más capas subterráneas de roca o de otros estratos geológicos que tienen la suficiente porosidad y permeabilidad para permitir ya sea un flujo significativo de aguas subterráneas o la extracción de cantidades significativas de aguas subterráneas;

12) <<masa de agua subterránea>>: un volumen claramente diferenciado de aguas subterráneas en un acuífero o acuíferos.”

La CHG ha definido las masas de aguas subterráneas existentes dentro de la Cuenca Alta del Guadiana que ascienden a un total de 11, de las cuales 2 se corresponden con los acuíferos aluviales fluviales del Azuer y Jabalón. En la Tabla A.7 se especifica la relación existente entre las 9 masas de agua subterráneas restantes y las unidades hidrogeológicas definidas dentro de la Cuenca Alta, que se representa gráficamente en la Figura A.8.

Tabla A.7. Correspondencia entre unidades hidrogeológicas y masas de agua subterránea de la Cuenca Alta del Guadiana. (Fuente: Elaboración propia a partir de cartografía de la CHG)

Masa de agua subterránea (código)	Extensión (km <sup>2</sup> )	Unidades Hidrogeológicas asociadas
Sierra de Altomira (041.001)	2.574,9	UH 04.01
La Obispalía (041.002)	495,0	-
Lillo – Quintanar (041.003)	1.109,2	UH 04.02
Consuegra – Villacañas (041.004)	1.569,5	UH 04.03
Rus – Valdelobos (041.005)	1.713,2	UH 04.01 Y UH 04.04
Mancha Occidental II (041.006)	2.396,2	UH 04.04
Mancha Occidental I (041.007)	2.002,8	UH 04.04
Campo de Calatrava (041.008)	2.019,7	UH 04.05
Campo de Montiel (041.009)	2.221,7	UH 04.06

Las características de las masas de agua subterránea quedan por tanto definidas en la descripción previa que se ha realizado de las unidades hidrogeológicas, con la única excepción de la masa de La Obispalía, que no coincide con ninguna de las unidades.

Esta masa de agua se sitúa en el extremo nororiental de la cuenca, en la zona de cabecera de los ríos Gigüela y Záncara. Los materiales que constituyen la masa son depósitos miocenos, formados por areniscas, calizas y margas, apareciendo también materiales arcillosos de menor permeabilidad, así como zonas de aluviones de origen cuaternario (CHG, 2005). El mecanismo de funcionamiento hídrico se basa en la infiltración en zonas de mayor permeabilidad relativa y salida del flujo hacia acuíferos colindantes situados a menor altitud.



Figura A.8 Distribución de las masas de agua subterránea de la Cuenca Alta del Guadiana

Por otro lado, llama la atención la definición de una masa de agua subterránea, la de Rus – Valdelobos, que se sitúa a caballo entre las unidades de La Mancha Occidental y de la Sierra de Altomira. La salida en régimen natural de esta masa de agua debería producirse hacia las otras masas de agua del acuífero de la Llanura Manchega, que tiene como característica general un flujo de este a oeste. Sin embargo, como se analiza en el apartado dedicado al balance hídrico del acuífero de La Mancha Occidental, la alteración de los niveles piezométricos ha ocasionado un cambio en el flujo de las aguas subterráneas en esta zona del acuífero. Según se recoge en el PEAG (CHG, 2008), la descarga de esta masa de agua se produce en la actualidad de forma subterránea hacia la cuenca del Júcar.

Dentro de la masa de agua, existe una transferencia hídrica desde la parte situada en la unidad de la Sierra de Altomira hacia la englobada por La Mancha Occidental, hecho que ha motivado que en gran parte de los regímenes de explotación del acuífero de La Mancha Occidental se recoja un perímetro adicional dentro del acuífero de la Sierra de Altomira, donde se imponen a su vez ciertas limitaciones a las extracciones de agua.



Hay que indicar que, en todo este documento se utiliza el conjunto de la UH de La Mancha Occidental como unidad de trabajo, considerando la existencia de una conexión de las aguas subterráneas de todo el sistema. Este sistema queda definido por ocupar la llanura central hacia la que fluyen las aguas superficiales y se produce la transferencia de recursos subterráneos.

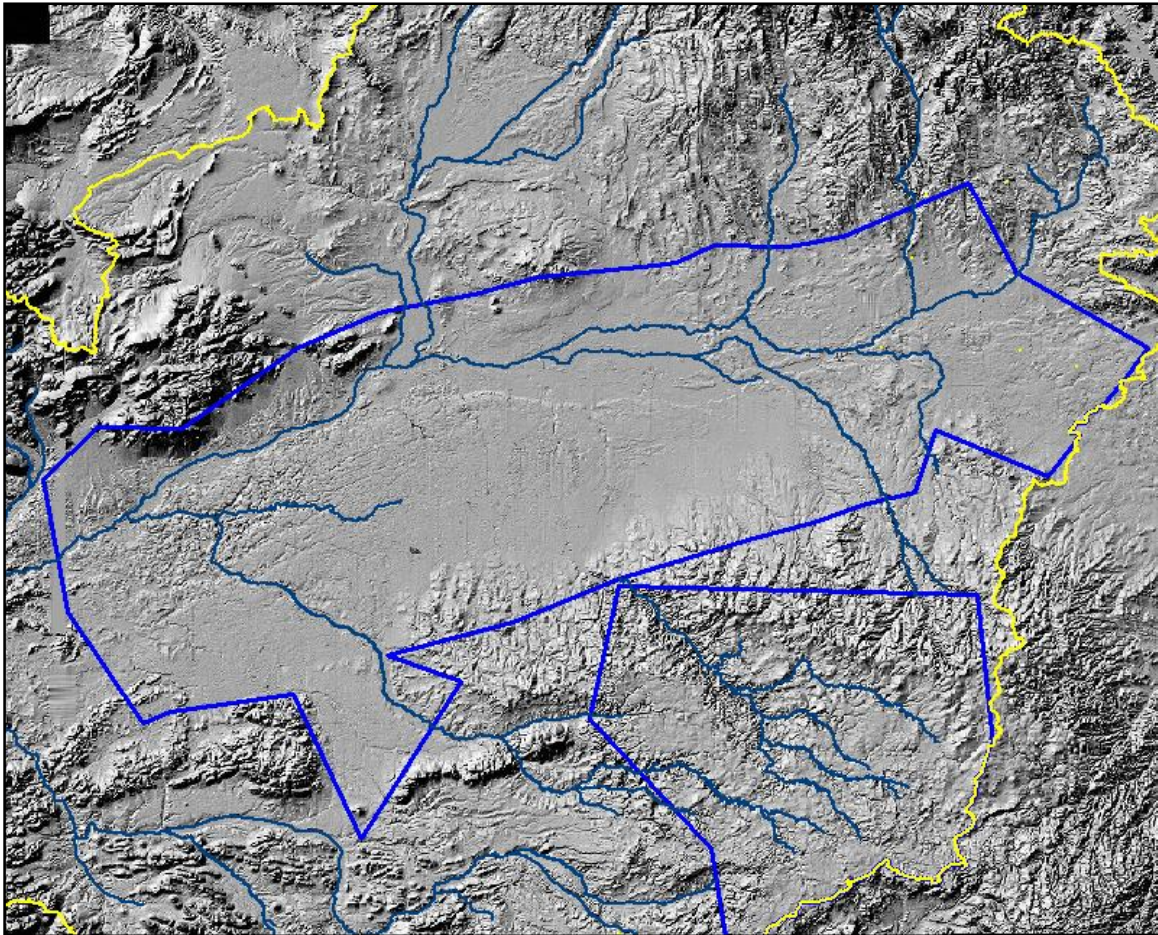


Figura A.9. Distribución de los perímetros sobreexplotados y de los principales ríos dentro de la Cuenca Alta del Guadiana sobre un mapa de relieve del terreno

#### **A.1.2.5. Fauna y flora**

Los tipos de materiales dominantes en los suelos, el relieve y las características climáticas son los factores más importantes para la definición del tipo de hábitats que puede albergar un territorio.

Como se ha comentado anteriormente, en la Cuenca Alta del Guadiana, nos encontramos con suelos formados sobre coberturas sedimentarias terciarias y mesozoicas, constituidos principalmente por materiales provenientes de la degradación de calizas, dolomías, margas y arcillas y yesos ricos en cal. Por este motivo, la zona de estudio forma parte de la región denominada como “España caliza”, donde dominan los suelos de tipo básico (con pHs mayores que 7) que suelen presentar una elevada tasa de

saturación y a menudo se ven afectados por precipitaciones de carbonatos dentro de su estructura edáfica.

Por otro lado, el intervalo de alturas de la zona (entre 600 y 1.000 metros), correspondiente a los pisos mesomediterráneo y parte de supramediterráneo, y la existencia de condiciones climáticas bastante extremas, centradas en una importante oscilación térmica anual, elevadas temperaturas en verano y precipitaciones reducidas con marcado estiaje, producen condiciones de aridez en los suelos.

La suma de todos estos condicionantes implican que la vegetación autóctona de la zona sea de tipo mediterráneo.

La vegetación clímax de las comarcas manchegas es el encinar (Peinado, 1982), que en algún momento debió formar una cubierta vegetal sobre la zona que hoy resulta difícil de imaginar. Los bosques de encinas (*Quercus ilex subsp. rotundifolia*) deberían tener una densidad importante, sobrepasando algunos ejemplares los diez metros de altura. El sotobosque debía ser de tipo umbrío con la presencia de especies de matorral de hábitats mediterráneos como lentisco (*Pistacia lentiscus*), zarzamora (*Rubus sp.*), rosál silvestre (*Rosa canina*), durillo (*Viburnum tinus*), rusco (*Ruscus aculeatus*) o majuelo (*Crataegus monogyna*) y abundantes lianas como la madreselva (*Lonicera sp.*) y las clemátides (*Clematis sp.*).

Desde el punto de vista del análisis de formaciones botánicas, (Rivas Martínez, 1987) la zona de estudio se correspondería con:

a) Serie mesomediterránea castellano aragonesa basófila de la encina (*Blaupeuru rigidi-Quercueto rotundifoliae* S.), que ocuparía la mayor parte de la Llanura Manchega y las zonas más secas y templadas del Campo de Montiel. Se produce en zonas que reciben precipitaciones entre 350-500 mm al año. Si llueve menos, el pino carrasco desplaza a la encina y si llueve más la desplaza el quejigo.

La principal especie es la encina (*Quercus ilex subsp. rotundifolia*), con porte alto en su estado de mejor conservación, que se transforma en matorral bajo en su primera etapa de degradación. En esta fase, acompañan a la encina, la coscoja (*Quercus coccifera*), el torvisco (*Daphne gnidium*), el enebro (*Juniperus oxycedrus*) y el espinero negro (*Rhamnus lycioides*).

Las principales etapas de sustitución son retamares, coscojares y pinares xerófilos (*Pinus hapelensis* y *Pinus pinea*). Si la degradación continúa se llega a romerales, espliegares y tomillares.

b) Serie supramediterránea castellano-maestrazgo-manchega basófila de la encina (*Junipero thuriferae-Quercueto rotundifoliae* S.), que sigue en orden de importancia a la anterior y suele aparecer en zonas de mayor altitud y temperaturas más extremas. Se trata de masas mixtas de encina y sabina albar (*Juniperus thurifera*) en altitudes superiores a 1.000 metros que se sitúan en varias zonas del Campo de Montiel.

En las etapas de sustitución de esta serie están ausentes los coscojares, romerales y atochares, que son desplazados en niveles altitudinales superiores por especies espinosas como *Erinacea anthyllis* y *Genista pumila*.

Sin embargo, las prácticas agrícolas realizadas sobre el territorio desde muy antiguo han producido la pérdida directa de este tipo de hábitat, ocasionando además una disminución importante de las capacidades de los suelos por desgaste, lavado y erosión.

En la actualidad, además de campos de cultivo, en la Cuenca Alta del Guadiana destaca la presencia de encinares claros y áreas de matorrales muy dispersos ocupando las zonas más elevadas y en general con menor espesor de suelo. Estas asociaciones de encinas dispersas y matorral, y las formaciones existentes de matorral constituyen etapas típicas del proceso de degradación del encinar, si bien este tipo de formaciones casi no aparecen en las zonas de mayor actividad agrícola.

Sobre la llanura arenosa de la zona oriental existen algunos núcleos de pinares de repoblación y otros más antiguos. Como especie predominante de este sotobosque aparece la encina y la carrasca, adquiriendo ambas un papel cada vez más importante en la estructura forestal. En las márgenes de los cursos de agua, así como en hondonadas inundables, hay choperas y cañaverales. En la actualidad, el mayor núcleo de encinar, con aparición de sabinar, se encuentra en el Campo de Montiel rodeando las Lagunas de Ruidera, dando lugar a una magnífica muestra de bosque mediterráneo.

En cuanto a la vegetación agraria destaca tradicionalmente como característica principal el cultivo de la vid, sobre todo en la Llanura Manchega. También aparecen manchas de olivar solo o mezclado con vid. El otro cultivo en el que se ha venido sustentando la agricultura manchega ha sido el de cereal de secano, pero en los últimos años el incremento de los regadíos tanto en primavera como en verano ha sido realmente considerable. Hay que tener en cuenta, que si bien desde un punto de vista natural, los cultivos representan la máxima degradación de la vegetación potencial, conforman el hábitat actual de numerosas especies adaptadas a las condiciones que proporcionan.

Por último hay que mencionar la singularidad e importancia de la vegetación ligada a las zonas húmedas. Más adelante, se describirán con mayor detalle las especies y formaciones que aparecen en los numerosos enclaves ligados a la presencia de agua que aparecen en La Mancha Húmeda. De momento, y a pesar de su poca extensión en relación a la amplitud del territorio, hay que mencionar su existencia y su valor como refugio de especies vegetales y elementos diferenciales del paisaje.

Los tipos y variedad de biotopos vegetales que se forman sobre el territorio son quizás el condicionante principal de la riqueza de fauna que éste puede llegar a acoger.

En el caso de la Llanura Manchega, la fauna se caracteriza por la presencia de las especies más típicas de los medios esteparios y semiesteparios de la zona de la meseta central, aunque la intensificación de la agricultura esta empezando a suponer un grave



riesgo para algunas de ellas. No obstante, también hay que indicar que la presencia de cultivos regados durante el verano proporciona una fuente de alimento muy importante para muchas especies que se benefician de la disponibilidad de recursos en la época más hostil del año. Sin embargo, la impresión que se puede obtener al realizar visitas de campo en la zona es que la intensificación agraria no favorece la biodiversidad de especies animales en la zona sino que produce un aumento de las poblaciones de las especies que están siendo capaces de adaptarse de una manera más rápida a los cambios introducidos.

Entre los mamíferos, las poblaciones de liebre y conejo son tremendamente abundantes, hasta el punto de que muchos agricultores las tachan en la actualidad de plaga. Otros mamíferos como el zorro, el jabalí o los roedores, sin duda también se están viendo favorecidos por el aumento de disponibilidad de alimento.

Las aves, son muchas veces las especies más fáciles de avistar y dentro de los animales de gran tamaño conforman el taxón de mayor variedad. Dentro de este grupo hay un conjunto de especies que son en la actualidad tremendamente comunes dentro de la unidad de La Mancha Occidental, como la perdiz roja (*Alectoris rufa*), la paloma torcaz (*Columba palumbus*), la abubilla (*Upupa epops*), la alondra común (*Alauda arvensis*), la cogujada común (*Galerida cristata*), la urraca (*Pica pica*), la grajilla (*Corvus monedula*), el estornino negro (*Sturnus unicolor*), el gorrión común (*Passer domesticus*) y el triguero (*Miliaria calandra*)

Además, dentro de las zonas de cultivos, arbolado disperso asociado y en las áreas de matorral próximas encontramos un número muy importante de especies de avifauna que se encuentran representadas en la región y que a nivel nacional se encuentran recogidas en el Libro Rojo de las Aves de España<sup>3</sup>. Las especies que han sido observadas durante las campañas de campo de los trabajos realizados en este estudio y cuya distribución coincide con la proporcionada por expertos (De Juana y Varela, 2005; Varela, 2007) son numerosas:

- Dentro de la categoría de “En peligro”, aparecen la alondra ricotí (*Chersophilus dupontii*), el milano real (*Milvus milvus*) y el águila imperial ibérica (*Aquila adalberti*) (no observada, pero en dispersión por el Campo de Montiel según información aparecida en estudios recientes).
- Dentro de la categoría de especies “vulnerables”, encontramos el aguilucho cenizo (*Circus pygargus*), el cernícalo primilla (*Falco naumanni*), el sisón común (*Tetrax tetrax*) (fácil de observar en la Llanura Manchega), la avutarda común (*Otis tarda*) (en aparente expansión), la ganga ortega (*Pterocles orientalis*), la

---

<sup>3</sup> Dentro de este libro (MMA, 2005b) y con carácter oficial, un grupo de ornitólogos de prestigio analizó el estado de las poblaciones de todas las especies de aves presentes en España, clasificando su estado de acuerdo a los criterios de amenaza establecidos por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.

ganga ibérica (*Pterocles alchata*), la tórtola europea (*Streptopelia turtur*), la carraca europea (*Coracias garrulus*) y la terrera común (*Calandrella brachydactyla*).

- En la categoría de “Casi Amenazada” se ha observado el milano negro (*Milvus migrans*), el alcaraván común (*Burhinus oedicephalus*), el alcaudón real (*Lanius meridionalis*) y el alcaudón común (*Lanius senator*).
- Por último de la categoría “Insuficientemente conocido” aparece el aguilucho pálido (*Circus cyaneus*).

Además, se pueden observar con cierta frecuencia otras especies: abejaruco (*Merops apiaster*), aguililla calzada (*Circus cyaneus*), cernícalo común (*Falco tinnunculus*), chotacabras pardo (*Caprimulgus ruficollis*), codorniz común (*Coturnix coturnix*), críalo europeo (*Clamator glandarius*), cuervo (*Corvus corvus*), jilguero (*Carduelis carduelis*), mochuelo europeo (*Athene noctua*), oropéndola (*Oriolus oriolus*), pito real (*Picus viridis*) y ratonero común (*Buteo buteo*).

Entre los reptiles habita la zona el lagarto ocelado así como diferentes tipos de lagartijas y culebras.

La Llanura Manchega y el Campo de Montiel son ricos en especies habituadas a condiciones esteparias, semiesteparias y a ambientes adehesados y de arbolado disperso, si bien muchas de estas especies se encuentran amenazadas fundamentalmente como consecuencia del elevado grado de antropización existente en el medio natural, que crea condiciones que favorecen en gran medida a unas especies frente a otras y que además induce amenazas directas para la fauna.

Tomando en consideración los humedales de la región, hay que tener muy en cuenta la importancia de las poblaciones de especies ligadas a zonas húmedas, que en muchos casos encuentran en la Mancha lugares ideales para su invernada, reproducción o de reposo durante sus movimientos migratorios. Dada la relación directa de este tipo de ecosistemas con la problemática hídrica existente en la zona, su análisis se llevará a cabo dentro del apartado que se centra en este tema.

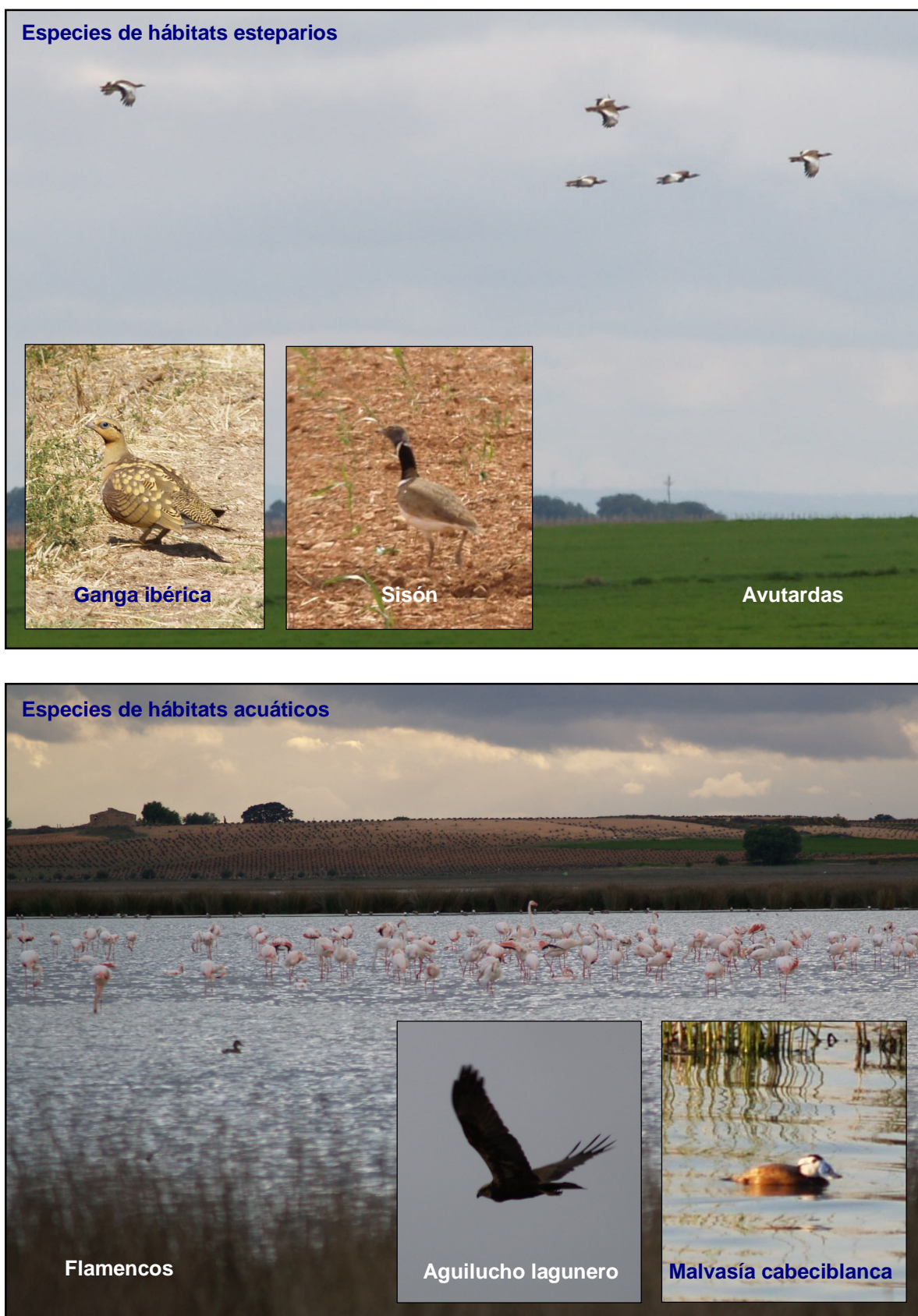


Figura A.10. Fotografías de aves propias de medios esteparios y acuáticos de La Mancha.

### **A.1.3. Medio socioeconómico**

El análisis de síntesis de las características del medio socioeconómico se centra en dos aspectos complementarios y de gran incidencia sobre el territorio: la demografía y la actividad económica. Ambos factores se estudian por separado, si bien se encuentran muy conectados. Su evolución en las últimas décadas guarda a su vez una relación directa con el aumento del regadío en la Llanura Manchega.

#### **A.1.3.1. Demografía**

Según la estimación llevada a cabo dentro del PEAG (CHG, 2008), la población de la Cuenca Alta del Guadiana en el año 2005 ascendía a cerca de 570.000 personas. Como primer análisis del dato, se infiere que la densidad poblacional de la Cuenca Alta del Guadiana –en torno a 30 hab/km<sup>2</sup>– se sitúa muy por debajo de la media nacional. Esto se debe a la ausencia de grandes núcleos de población en la zona y a la existencia de amplias zonas rurales que pueden considerarse auténticos desiertos desde el punto de vista demográfico.

Esta situación empezó a acentuarse en los años 60, a causa de los importantes movimientos migratorios que se produjeron hacia las grandes ciudades. Es a partir de esta década cuando a pesar de que el conjunto del país presentaba tasas de crecimiento poblacional positivas, en la zona se generaba una regresión considerable con fuertes pérdidas de población.

Así por ejemplo en la provincia de Ciudad Real la evolución demográfica ha sido positiva hasta finales de los años 50. Solamente los municipios de Alcázar de San Juan, Bolaños de Calatrava y Ciudad Real capital presentan un crecimiento poblacional constante a partir de estas fechas, mientras que en el resto de localidades se ha producido un fenómeno de despoblamiento general de grandes dimensiones, tanto por su intensidad como por su extensión. Este abandono se debe sin duda a la recuperación económica acaecida tras la recesión que siguió a la Guerra Civil, lo que produjo un considerable crecimiento de la actividad industrial centrada sobre todo en los cinturones de los grandes núcleos urbanos, hacia donde migró una gran cantidad de población procedente de las áreas más rurales. Además tras la estabilización de la situación política y socioeconómica después del final de la Segunda Guerra Mundial se estableció un fuerte flujo migracional hacia Centroeuropa especialmente desde las zonas más deprimidas, como era el caso de la Llanura Manchega (CHG, 1988).

La aceleración posterior del desarrollo económico propició al mismo tiempo una aceleración aún más acusada del éxodo rural y del movimiento a la ciudad, llegando el ritmo de despoblación a alcanzar velocidades vertiginosas, debiéndose tener en cuenta que las provincias con mayores tasas de emigración eran además las menos pobladas.

Esta migración hacia zonas más industrializadas ha repercutido en un proceso de envejecimiento de la población, ya que fue mayoritariamente el grupo comprendido entre los 20 y 45 años quien constituyó el núcleo fundamental emigrante (CHG, 1988). Este hecho conlleva una disminución del porcentaje de población activa, especialmente en la agricultura; sector en el que tradicionalmente se ha sustentado la economía del área, y origina un acusado descenso de la natalidad de la zona.

A partir de los años ochenta el fenómeno de la emigración paró, llegando incluso la zona a recibir inmigración, principalmente de mano de obra no cualificada que trabaja en peonadas agrícolas. En el periodo comprendido entre los años 1981 y 2005, la población dentro de la Cuenca Alta creció un 9%, dato que aún siendo muy inferior al del conjunto nacional para el mismo periodo (17%), muestra un claro cambio de tendencia. La población de origen extranjero en el año 2005 alcanzaba el 5% del total (CHG, 2008).

Aún manteniendo el denominador común de baja densidad, la distribución poblacional dentro de la Cuenca Alta resulta bastante variable. Aunque existen únicamente 5 ciudades de tamaño medio con poblaciones superiores a los 20.000 habitantes (Alcázar de San Juan, Ciudad Real, Tomelloso, Valdepeñas y Villarrobledo), la suma de su población supera el tercio del total de la Cuenca Alta (CHG, 2008). Esta elevada concentración de la población en las ciudades existentes permite esbozar el preocupante escenario de despoblación del territorio.

Siguiendo con el análisis de distribución de la población, un 30% vive en núcleos de entre 10.000 y 20.000 habitantes (12 poblaciones) mientras que cerca de un 16% habita en núcleos de entre 5.000 y 10.000 habitantes (15 poblaciones). En cuanto a las poblaciones más pequeñas, un 15% de la población habita en pueblos de tamaño medio (entre 1.000 y 5.000 habitantes) mientras que solo un 6% vive en pueblos de menos de 1.000 habitantes, a pesar de que éstos representan el 66% del total de núcleos poblacionales de la Cuenca Alta (CHG, 2008). Todos estos datos reafirman el carácter dominante rural del medio humano en la zona, en la que predominan los núcleos de muy pequeño tamaño, y con un cierto riesgo de despoblamiento.

Como consecuencia de esta dinámica se ha generado un considerable problema de desertificación en el campo. Los habitantes de las zonas rurales han escapado de ellas hacia zonas más urbanas, debido a problemas estructurales complejos y de difícil solución y sin prácticamente posibilidades de retorno. La Cuenca Alta del Guadiana sigue siendo una zona eminentemente agrícola y ganadera, que ha alcanzado un escaso grado de desarrollo endógeno.

En resumen nos encontramos ante una zona con importantes deficiencias en el aspecto demográfico, bajas tasas de natalidad y de crecimiento vegetativo y densidades medias de población muy reducidas. La situación de algunas áreas se está convirtiendo en un fenómeno de carácter irreversible, en las que se puede estar produciendo un abandono progresivo de territorios con recursos potencialmente rentables económica y socialmente.

No obstante, conviene resaltar el mantenimiento de la población, e incluso su crecimiento, en los núcleos rurales cuya actividad agraria fundamental es el cultivo en regadío, siempre que cuenten con garantías adecuadas de suministro de agua. Este hecho incide en la demostración del efecto estructurante del regadío en la ordenación del territorio. Dentro del PEAG, se incluye un gráfico de futuro demográfico basado en el análisis de la dinámica demográfica municipal y del grado de envejecimiento de la población, donde se observa de forma gráfica esta realidad.

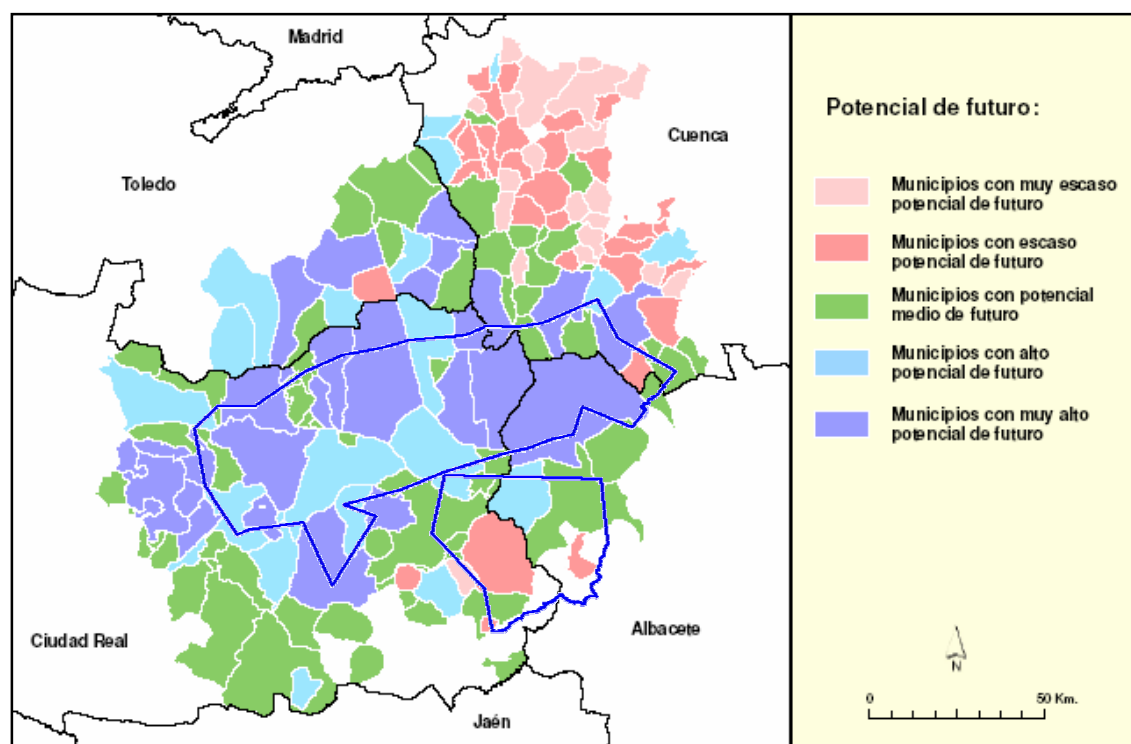


Figura A.11. Potencial de futuro demográfico de los municipios de la Cuenca Alta y límite de los perímetros de sobreexplotación. (Fuente: Adaptado de CHG, 2005)

El acuífero de La Mancha Occidental aglutina prácticamente dos tercios del total de población de la Cuenca Alta y contiene los principales centros de población con la única excepción de la capital provincial. Esta zona está considerada en la actualidad como una de las más dinámicas en términos de población y economía de toda Castilla La Mancha (Llamas y Martínez Campos, 2005).

#### **A.1.3.2. Marco económico**

Las provincias integrantes de la Cuenca Alta del Guadiana se han caracterizado tradicionalmente por su bajo nivel de "renta per capita» y el reducido peso de sus producciones sobre el total nacional (CHG, 1987). Todo ello se motiva por un lado por el excesivo peso del sector agrario en relación al total de población activa, caracterizado por una baja productividad, y por otro, por el escaso desarrollo del sector industrial.



El nivel de depresión económica de la cuenca queda claramente reflejado en el proceso de despoblamiento sufrido, el cual redundaba a su vez en la crisis económica, ya que la población emigrante además de estar formada en su mayoría por personas en edad productiva, suele tratarse de la más cualificada.

En la Cuenca Alta del Guadiana existen unos notables recursos que posibilitan su desarrollo económico, pudiendo jugar un papel relevante la proximidad a los grandes mercados de Madrid y Valencia en la capacidad de absorción de su producción.

Según datos del INE de 2001, (basados en datos de Contabilidad Regional de España y en el Censo de la Población y Vivienda), un total de 32.741 personas se encontraban empleadas dentro de alguno de los sectores de la industria manufacturera de la Cuenca Alta. Entre estos sectores destacan por orden de importancia, la industria textil y de confección (24%), el sector de bebidas y alimentación (22,5%), la metalurgia y fabricación de productos metálicos (15,5%) y la industria de la madera (14,5%). El Valor Añadido Bruto correspondiente a esta actividad industrial ascendió a los 830 millones de euros.

La población activa dedicada al sector agrario sumó en 2001, según la misma fuente de datos, un total de 34.600 empleos, con un Valor Añadido Bruto de 786 millones de euros. De este total de puestos de trabajo, se estima que en torno a 18.500 corresponden a cultivos situados en el área de influencia del acuífero de La Mancha Occidental (53,5% del total), mientras que en torno a 4.000 se sitúan en el acuífero del Campo de Montiel (11,5%). Se observa como la productividad media del sector agrícola resulta inferior a la del sector industrial.

El empleo ligado al sector de la construcción representaba dentro de la Cuenca Alta un porcentaje similar al aportado por los sectores industrial y agrario (Martínez-Cortina, 2002).

Sin embargo, este equilibrio se deshace dentro del acuífero de La Mancha Occidental, donde la distribución de ocupación sectorial bascula claramente hacia la agricultura.

Tabla A. 8. Distribución (%) de ocupación por sectores en el año 2000, en el territorio incluido dentro del acuífero de La Mancha Occidental. (Fuente: Olmedo, 2002)

Sector productivo	Porcentaje de ocupación por zona (%)		
	U.H. Mancha Occidental	Castilla La Mancha	España
Agricultura	38	10	7
Construcción	14	15	11
Industria	12	20	20
Servicios	36	55	62



Estos datos aseveran el carácter rural y agrícola de la zona sobre la que se sitúa el acuífero de La Mancha Occidental.

En los últimos años, se ha desarrollado ligeramente la pequeña y mediana industria, que localizada en las cabeceras comarcales permite una alternativa a la agricultura. Sin embargo, hay que tener en cuenta que gran parte de esta industria se encuentra ligada a las actividades agrícolas, bien desde el punto de vista de suministro de materias primas y material, bien asociada a la transformación de productos agrarios en bienes de consumo.

Todo este conjunto de datos permite esbozar un diagnóstico de la situación. El territorio es eminentemente agrario, apareciendo zonas, coincidentes con aquellas donde no existe la posibilidad de puesta en regadío de terrenos, con riesgo de despoblamiento y con índices acusados de depresión económica.

Es cierto que sus circunstancias estructurales y su medio geográfico no constituyen posiblemente el medio más idóneo para la ubicación de grandes complejos industriales, aunque en los últimos años la mejora de infraestructuras de transporte ha sido muy apreciable. Sin embargo nada se opone al establecimiento de un mayor número de industrias de tamaño medio que ayudarían a desplazar de la zona parte de sus problemas de subempleo, paro y emigración, beneficiándose los empresarios de una mano de obra abundante.

El insuficiente aprovechamiento de los recursos productivos afecta claramente a las potencialidades de la zona, que básicamente se encuentran ligadas al sector primario. La falta de una ordenación y racionalización de los recursos disponibles para algunas actividades y de adecuación de la política agraria a medio y largo plazo a la situación económica existente, cuyo objetivo debería ser mantener en el campo un contingente de población con rentabilidades y productividades aceptables, son los aspectos que inciden más negativamente en este punto. Es necesario establecer una política para el sector agrario a largo plazo, que evite la progresiva pérdida de posibilidades en este sector por el abandono y consiguiente deterioro de los recursos básicos, por la sobreexplotación en muchos casos de los mismos y por la falta de la mano de obra.

En este contexto, el desarrollo de la agricultura de regadío en la región, aunque desmesurado, ha supuesto un fuerte impulso económico que ha elevado el nivel de rentas de la zona y ha ayudado a paliar el déficit estructural de la misma.

Sin embargo, el modelo intensivo de aprovechamiento de los recursos hídricos para el riego agrícola no presenta un patrón sustentable en el tiempo, y se enfrenta a las condiciones de conservación del medio natural impuestas por el ordenamiento jurídico vigente.

Además, el uso del agua no se realiza en su mayor parte, ni por personas que tengan en la agricultura su medio de vida principal, ni sobre cultivos con un elevado valor añadido y un amplio mercado de distribución. La mano de obra necesaria para las labores agrícolas

resulta poco especializada y tiene una remuneración baja, y los beneficios de las cosechas son muy variables entre diferentes años, dependiendo de la situación de los mercados agrarios.

El peso de la agricultura dentro del sector agrario seguirá siendo elevado en los próximos años, ya que los cambios de modelo productivos son lentos y progresivos, si bien, el camino a seguir debe potenciar la puesta en valor de la riqueza natural de la región y la producción de bienes agrícolas de mayor calidad y potencial de exportación a nivel nacional e internacional. Estas transformaciones deberán ir acompañadas de un uso mucho más eficiente y ordenado de los recursos hídricos.



## **A.2) Agua: problemática en la Cuenca Alta del Guadiana**



**Portada del capítulo 2 del Apéndice: Riego por aspersión dentro de la zona de manantiales de los Ojos del Guadiana**

## **A.2. AGUA: PROBLEMÁTICA EN LA CUENCA ALTA DEL GUADIANA**

A pesar de que la primera impresión que el paisaje manchego suele producir en cualquier observador, suele relacionarse con la aridez y sequedad del medio, la región manchega es una región rica en recursos hídricos, donde los sistemas acuíferos existentes bajo el subsuelo constituyen un auténtico mar interior que se manifiesta en diferentes formas a lo largo del territorio.

En este capítulo se aborda la descripción de la problemática existente en torno a la gestión y sobreexplotación de los recursos hídricos de la Cuenca Alta del Guadiana.

Con objeto de situar el origen del problema, se comienza con una introducción acerca de la relación generada, desde un enfoque temporal amplio, entre hombre y agua en la región. Posteriormente se describen las actuaciones que, principalmente guiadas por el desarrollo agrícola, se han llevado a cabo sobre el territorio y las consecuencias y trascendencia que éstas están teniendo sobre el equilibrio hídrico de la zona, tanto desde un punto de vista de gestión del agua como en relación a la alteración de hábitats y condiciones ecológicas del medio natural.

### **A.2.1. La relación histórica entre hombre y agua en la región de La Mancha**

La región manchega mantiene una relación realmente especial con el río Guadiana, que se convierte en el eje descriptivo y geográfico de toda la región. Este río, es sin duda de uno de los más peculiares, si no el más, de toda la península.

Su nacimiento se produce por la descarga de un sistema acuífero situado bajo una extensa llanura, no teniendo su cabecera en un sistema montañoso como suele ser más habitual. Las recargas del sistema acuífero tienen orígenes muy variados, produciéndose de forma natural por infiltración de aguas superficiales (Pinilla, Záncara,...), por aportaciones directas de otros sistemas acuíferos y por recogida de las precipitaciones que se infiltran en la llanura y de forma más reciente recogiendo excedentes de riego y aguas residuales de poblaciones.

El río Guadiana nace en una zona de manantiales sin apenas relieve formando el humedal conocido como Ojos del Guadiana. Pocos kilómetros después, este nuevo río, cuando une sus aguas con las del Gigüela, forma un verdadero estuario interior, sostenido por el acuífero de la Llanura Manchega: las Tablas de Daimiel, declaradas Parque Nacional en 1973.

En su área de influencia, más al norte, en torno a los ejes constituidos por los ríos Gigüela y Záncara, se asienta un conjunto de humedales extraordinariamente diverso y valioso, que alberga ríos de curso divagante, vegas de inundación, lagunas esteparias y

manantiales muchas veces ricos en aguas carbonatadas, cloruradas y sobre todo sulfatadas.

Todo el conjunto de una forma u otra está relacionado con el acuífero 04.04, y forma "La Mancha Húmeda" uno de los patrimonios naturales más ricos de nuestra geografía, y cuya riqueza ecológica y cultural ha sido reconocida por la UNESCO con la distinción de la figura de "Reserva de la Biosfera".

La conjunción de las especiales características físicas, geológicas, climáticas y sobre todo hidrológicas del medio, ha acabado configurando el marco donde se han desarrollado las comunidades humanas que durante milenios han ocupado el territorio. Sin restar importancia a la influencia que los procesos ideológicos, militares, políticos o religiosos han tenido sobre las sociedades manchegas, lo cierto es que el acceso al agua ha condicionado en buena medida el entorno cultural y económico de la comarca (Rueda, 1992).

Las constantes alternativas que el recurso agua (agua dulce - salobre, superficial subterránea, sequía - inundación, paludismo - aguas medicinales) ofrece a los habitantes de este territorio, ha acabado modelando un verdadero entramado económico - cultural - ambiental, que en buena medida definen lo "manchego". Un entramado que aproxima estas culturas a otras del área mediterránea, a la vez que las diferencia de otras peninsulares, geográficamente más próximas (Rueda, 1992).

Examinando en un mapa la posición de los principales núcleos históricos de población de la zona, se observa claramente como los mismos se encuentran situados, bien a orillas de cauces de aguas superficiales, bien en la zona perimetral del acuífero donde las aguas se encuentran menos profundas. La zona central de la llanura se encontraba ocupada por extensos encinares que progresivamente han ido sido sustituidos por tierras de cultivo.

Al tener que habitar áreas en las inmediaciones de los cursos fluviales o de aguas estancadas o con niveles freáticos muy próximos a la superficie, la población de La Mancha se ha visto enfrentada casi de manera endémica a dos serios problemas: las inundaciones y el paludismo, que han constituido graves peligros a la hora de ocupar el territorio.

A pesar de ello, y aunque la agricultura es y ha sido de siempre la principal fuente de ingresos en La Mancha, la explotación de los humedales ha proporcionado tradicionalmente abundantes recursos económicos en la región. Los principales son los siguientes:

- la extracción de sal, aprovechando sus altas concentraciones en algunas zonas.
- uso de la vegetación; tanto para pastos como para la construcción o la obtención de fibras (Cirujano, 1996).
- la extracción de turba, usada fundamentalmente como combustible.



- aprovechamientos terapéuticos y medicinales de algunas de las aguas ricas en sulfatos, yodatos y otras sales (Rueda, 1992).
- posibilidades cinegéticas, sobre todo de especies muy ligadas al medio acuático como las anátidas. Las Tablas han sido consideradas históricamente como uno de los cazaderos de mayor calidad de la Península, y visitadas por este motivo por numerosos monarcas y nobles (Blas, 1988).
- pesca del cangrejo y de la carpa.

No obstante, en el pasado los humedales han sido considerados como terrenos mucho menos productivos que los agrícolas, de poco valor, y fuente de problemas y enfermedades, por lo que se ha promovido su desecación hasta épocas recientes. Hoy en día se consideran espacios claves para la conservación de la naturaleza y se respeta mucho más su valor paisajístico y natural, aunque siguen siendo áreas expuestas a múltiples perturbaciones.

En la actualidad, la relación entre el hombre y el agua en la Llanura Manchega se encuentra en un momento de grave crisis por la falta de modelos claros. A lo largo de los siglos, en la Llanura Manchega se ha producido la superposición de culturas diversas, que han ido dejando su huella sobre el territorio que las acogió para en último término constituir una cultura propia sobre un territorio peculiar. Así se generaron pautas propias de explotación y de gestión de los recursos naturales, en especial del recurso agua, que aparece como la base de la cultura económica de la zona.

El resultado era un modo de aprovechamiento integral, que había sabido detectar de acuerdo con las demandas de cada particular momento histórico, todas las posibilidades económicas de la región, tanto agrícolas como ganaderas, energéticas, salineras, cinegéticas, piscícolas... Se había construido un delicado entramado que permitió durante siglos compatibilizar el acceso al agua para los más diversos usuarios, adaptando el modelo productivo a la realidad física de la región y a la realidad social de las comunidades.

Este equilibrio que hacía posible la diversidad y estabilidad en la explotación de los recursos naturales, se rompe a mediados de los años setenta con el desarrollo del regadío a partir de extracciones del acuífero de La Mancha Occidental. El desarrollo de este nuevo modo de producción va a hacer confluir el recurso agua de manera casi exclusiva hacia un único sector, el agrícola, en detrimento de los restantes. Evidentemente la aparición del regadío extensivo por iniciativa privada, sólo se explica por la necesidad de elevar las rentas regionales, pero también es cierto que ha arrastrado a toda la comunidad a una situación de verdadera crisis en los modelos productivos. Sin duda, actualmente el gran debate de la región se centra en torno a la generación de nuevos modelos sostenibles de explotación del agua (Serna y Gaviria, 1995).

Dentro de este contexto resulta fundamental definir las funciones y servicios que son capaces de proporcionar las zonas húmedas de la región y que representan importantes beneficios directos e indirectos para las poblaciones de la zona. Estas funciones y servicios (que van más allá de los bienes de aprovechamiento directo anteriormente comentados) no son muchas veces tomados en cuenta dentro de los procesos de toma de decisiones, bien por desconocimiento de la trascendencia de su papel dentro de los procesos ecológicos regionales, bien por ser su valor muy complicado de cuantificar desde un punto de vista económico y social.

La lista de las principales funciones y servicios llevados a cabo por los humedales manchegos se resume en la siguiente tabla (Florín, 2001):

Tabla A.9. Funciones y servicios de los humedales manchegos (Adaptado de Florín, 2001)

Función / Servicio	Descripción y ejemplos de su beneficio
Descarga de agua subterránea	Libera agua del subsuelo en superficie. Diversifica el paisaje y mantiene comunidades vegetales propias.
Amortiguación de inundaciones	Regulación y retardo del caudal máximo de crecida. Los ecosistemas de vega fluvial en buen estado reducen los daños económicos de las crecidas.
Captura de sedimentos	Retención o depósito de partículas orgánicas e inorgánicas. Mejora de la calidad de aguas de ríos y contribución a la formación de suelos.
Acumulación de sales	Formación de depósitos salinos. Explotación industrial, disminución de la salinización de suelos en otros puntos.
Reciclaje y eliminación de nutrientes	Participación activa en el ciclo de nutrientes. Favorece la diversidad de especies y la disponibilidad de alimento para la fauna.
Producción y acumulación de materia viva	Condiciones óptimas para la acumulación de materia vegetal. Explotación de turberas.
Hábitat de animales de interés comercial	Condiciones óptimas como hábitat par muchas especies de interés comercial.
Mantenimiento de la biodiversidad y hábitat para la vida silvestre	Condiciones ambientales óptimas para muchas especies. Papel como corredores ecológicos dentro de un entorno muy transformado.
Soporte de actividades recreativas	Espacios con amplias posibilidades de disfrute.
Atracción de turismo	Constituyen uno de los principales reclamos del territorio, con importancia reconocida a nivel nacional e internacional.
Funciones educativas y científicas	Presencia de procesos físicos, químicos, biológicos y de valores paisajísticos de interés.
Seña de identidad territorial	Parte fundamental del carácter propio del territorio. Claves en referencias culturales, literarias y tradicionales.

## **A.2.2. Desarrollo e importancia de la agricultura de regadío en la región**

La problemática hídrica existente en la actualidad se ha originado por un aumento casi descontrolado de la agricultura de regadío en la región, principalmente dentro de los acuíferos de La Mancha Occidental y del Campo de Montiel, por lo que el análisis realizado en este apartado se centra fundamentalmente en esta área. El desarrollo agrario ha transformado, en no demasiados años, La Mancha Occidental desde un territorio donde la agricultura de secano era la actividad principal hasta convertirla en la región española donde el número de hectáreas regadas por habitante alcanza valores más elevados (Serna y Gaviria, 1995).

La problemática relativa a la sobreexplotación de los acuíferos de la Cuenca Alta se desarrolla en otros apartados, por lo que aquí se analiza la evolución de las superficies en regadío y del consumo de agua, así como su relación directa con el aumento de la renta regional.

### **A.2.2.1. Desarrollo histórico del uso de los recursos hídricos para agricultura**

En la actualidad, y con mucha diferencia en relación a otros usos, el principal consumidor de agua en la Cuenca Alta es el regadío, cuya demanda representa más del 90% del total (Llamas y Martínez-Santos, 2005; CHG, 2008). El análisis de la evolución de las superficies de riego ofrece una visión global de cómo ha evolucionado el aprovechamiento de los recursos hídricos.

En lo referente a la Cuenca Alta, la evolución de la superficie regada es casi independiente de la disponibilidad de recursos regulados superficiales. Se observa que la entrada en funcionamiento de las presas de Peñarroya (1959), El Vicario (1973) y Torre Abraham (1974) no se refleja en un aumento significativo de la superficie regada aunque evidentemente proporcionen una buena garantía para los riegos de las zonas situadas aguas abajo de las mismas (CHG, 1993). Así la evolución de las superficies en riego se debe casi enteramente a las extracciones de aguas subterráneas, regándose la práctica totalidad de superficie de la llanura con agua del subsuelo.

Un estudio detallado de la evolución socioeconómica de la Llanura Manchega desde mitad del siglo XIX hasta la actualidad (Velasco, 2005), muestra como “un modelo de desarrollo agrario (la implantación del viñedo) fue capaz de asegurar el crecimiento económico y las mejoras sociales de la población durante casi todo un siglo (1860-1940) y que su crisis conllevó de forma inmediata la crisis económica y social para esta región”.

La viña surgió como alternativa al cereal de secano ante la pérdida de mercado para la exportación ligada al declive colonial acaecido durante el siglo XIX. Así desde finales de este siglo y principalmente durante el primer tercio del siglo XX, la superficie cultivada de

viñedo creció espectacularmente. Un primer impulso vino dado por la invasión de la plaga de Filoxera, que sufrieron viñedos de la mayor parte de las regiones productoras del país y que contribuyó a la rápida instauración del viñedo en la zona. Posteriormente, la llegada del ferrocarril, facilitó la salida de los mostos hacia otras regiones del mercado nacional e internacional, que en la época de la 1ª Guerra Mundial y de posguerra se convirtió en el principal consumidor de este producto.

Sin embargo, la falta de avances en la calidad de los mostos y caldos y la recuperación económica exterior afectaron gravemente a las exportaciones, hasta el punto de que en 1930 ya se detectaba una saturación del mercado. Esta situación se agravó tras la Guerra Civil, llegando a numerosas quiebras en industrias alcoholeras en los años cincuenta y a una reducción tal del valor del producto que llevó a la concesión de precios de garantía y subvenciones estatales.

La gráfica de evolución poblacional en la zona durante el periodo 1900-1970 muestra la elevada dependencia de la región del modelo agrícola de expansión del viñedo.

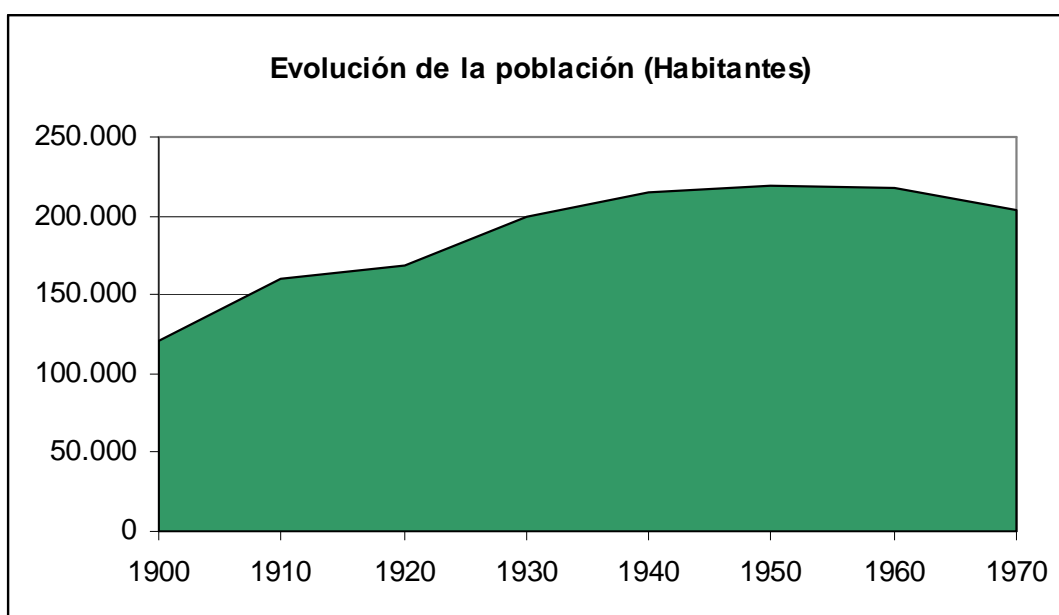


Figura A.12. Evolución de la población en la Llanura Manchega entre 1900 y 1970. (Fuente: INE)

Dentro de este contexto de crisis del modelo agrario productivo basado en el viñedo y el cereal de secano, y que había vuelto a producir un estrangulamiento demográfico en la zona, es donde hay que colocar el inicio de la expansión del regadío como modelo de sustitución.

Ha sido en el periodo comprendido entre la década de los 50 y la aprobación de la Ley de Aguas de 1985 el que se ha correspondido con una expansión más rápida de los regadíos a partir de extracciones de aguas subterráneas en la Cuenca Alta.

La transformación de secanos tradicionales (fundamentalmente cereales) a regadíos fue alentada en un primer momento desde las Instituciones (IRYDA, IGME,...) como la mejor salida para pasar de un modelo agrícola de subsistencia a otro de mayor valor añadido. En este sentido, quizás el Plan de Colonización de la Mancha, basado en la puesta en riego de terrenos en el centro de la llanura mediante aguas extraídas de pozos públicos, supuso el pistoletazo de salida para el comienzo de la propagación del regadío en la Mancha. Animados desde la administración, fue la iniciativa privada de muchos agricultores la que inició el proceso de cambio. La descoordinación de competencias sobre la gestión de aguas superficiales y subterráneas favoreció que desde un primer momento existiese un evidente descontrol sobre el nivel de transformación que estaba sufriendo el territorio. Con el inicio del Estado de Autonomías, el proceso se aceleró, ya que desde la Consejería de Agricultura de Castilla La Mancha se subvencionaron y facilitaron créditos blandos para la inversión en la adquisición y puesta en uso de infraestructura de riego, a pesar de que en aquella época eran ya muchas las voces críticas sobre las posibles consecuencias que estaba teniendo sobre el territorio la expansión descontrolada de las superficies regadas. Toda esta situación se desarrolla más en detalle en un capítulo posterior, pero sirva esta breve introducción para esbozar los motivos que causaron el rápido aumento de la superficie regada.

#### **A.2.2.2. Evolución de superficie regada en la Llanura Manchega y Campo de Montiel**

Desde mitad de los años 70, fecha en que se considera que comenzó a generalizarse el regadío en la zona, la CHG dispone de estimaciones de superficie regada en el acuífero de La Mancha Occidental realizadas fundamentalmente a partir de estadísticas agrarias. Estos datos no permiten conocer la distribución de cultivos ni afinar en la cifra de superficie regada real de cada tipo de cultivo, aunque resultan el mejor indicador disponible para el análisis de la evolución de superficie regada en la zona.

El análisis de las superficies regadas puede dividirse en dos ciclos:

- Periodo 1974-1993: donde se produjo un aumento descontrolado de la superficie en regadío que obligó a la declaración de sobreexplotación provisional del acuífero.
- Periodo 1993-2008: que se inicia con la aprobación de la Declaración Definitiva de Sobreexplotación del acuífero y la entrada del Plan de Compensación de Rentas de la UE para la desincentivación del regadío. Ambas medidas han sido críticas para la reducción y estabilización de las extracciones.

Desde 2008, se puede considerar el comienzo de un nuevo periodo de referencia, coincidente con el inicio de las medidas previstas por el Plan Especial del Alto Guadiana para la recuperación del buen estado hídrico de la Cuenca Alta.

En relación al primer periodo de interés, desde 1974, en que se estimó un riego de unas 28.700 ha con aguas subterráneas, se aprecia una clara tendencia creciente en el uso de estas aguas para el riego en esa zona. Los ritmos de crecimiento de la superficie regada se cifran en torno a 8.000 ha/año hasta el año 1987, en que comienza a decrecer el ritmo, llegándose en 1989 a una cifra máxima de superficie de 126.600 ha. Hay que tener en cuenta que la mayor parte de esta superficie correspondía a cultivos herbáceos de alta dotación regados durante el verano, como maíces, alfalfas y remolachas, encontrándose el riego del viñedo prohibido en aquellos momentos. Dentro de este proceso, hay que remarcar que fue la entrada de España en la Unión Europea la que favoreció, a partir de los instrumentos de la Política Agraria Común, la rápida expansión de este tipo de cultivos, de gran consumo hídrico.

En el año 1990 se invierte la tendencia registrándose un descenso apreciable de la superficie regada, en torno a 10.000 ha, tendencia que se mantuvo en 1991, con una disminución total de casi 24.000 ha. En el año 1992 sigue la tendencia decreciente de la superficie regada, aunque a menor ritmo (del orden de 4.000 ha menos que en 1991), llegándose a producir en 1993 un ligerísimo incremento de la misma (en torno a 200 ha). Este descenso pudo producirse en parte por el inicio de la aplicación del Régimen de Explotación del acuífero, aprobado por primer año en 1991 como consecuencia directa de la declaración provisional de sobreexplotación del acuífero en 1987, aunque seguramente el motivo fundamental fuese la conjunción del comienzo de los descensos en los niveles piezométricos impidiendo el acceso al agua a numerosos regantes con el inicio en 1990 de un periodo extremadamente seco que llegó hasta el año 1995.

De todas formas, hay que indicar que debido a los condicionantes impuestos por la Confederación a raíz de la declaración de sobreexplotación del acuífero, tanto la superficie cultivable en regadío dentro del total de la explotación como el volumen de agua utilizado se encuentran seriamente limitados.

Esta medida, junto con todas aquellas otras figuras jurídicas y administrativas que han influido en la evolución del regadío en la zona se analizan con mucho mayor detalle en un capítulo posterior del presente trabajo de investigación.

De acuerdo a los datos estimados de superficie regada, se utilizaron modelos hidrogeológicos para la estimación aproximada de los volúmenes extraídos del sistema acuífero para su uso en agricultura. La Figura A.13, muestra la evolución creciente del regadío y de sus extracciones estimadas de agua hasta finales de los ochenta, que alcanzaron un máximo de 568 hm<sup>3</sup> en 1988, aunque como ya se ha indicado, la máxima superficie regada se registra en 1989. En 1994 la situación ya había mejorado ostensiblemente, alcanzándose un volumen final de extracciones para riego de 246 hm<sup>3</sup> (CHG, 1996b). Ese volumen representa del orden del 44% del volumen medio de extracciones de finales de los ochenta.

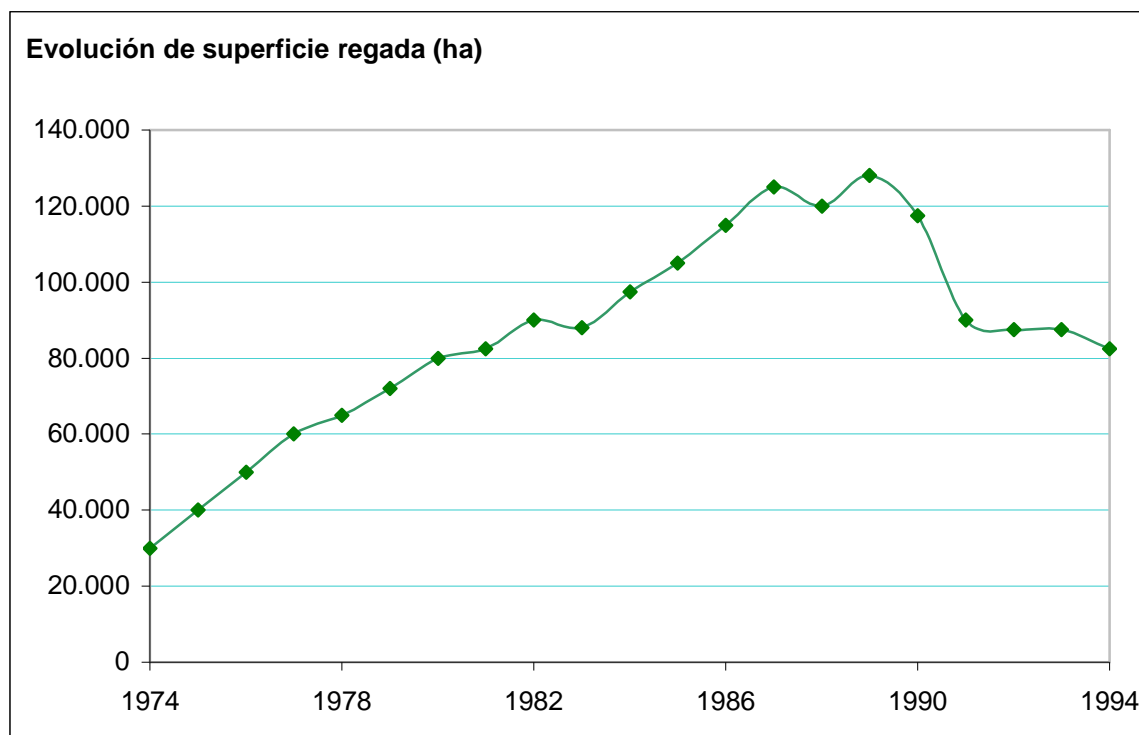


Figura A.13. Evolución estimada de las superficies regadas en La Mancha Occidental en el periodo 1974 -1994. (Fuente: CHG)

En el año 1993, entró en vigor el Plan de Compensación de Rentas financiado por la Unión Europea a partir del Programa Agro-Ambiental de la Política Agraria Común. Este Plan fue diseñado fundamentalmente con una doble finalidad: por un lado, un objetivo social centrado en limitar el efecto de la sequía en la economía regional y por otro, un objetivo ambiental que buscaba la recuperación de la conexión hidrológica entre el acuífero y las Tablas de Daimiel.

Como consecuencia de la sequía y las medidas adoptadas, en el año 1994 se produjo una fuerte disminución de la superficie regada estimada (del orden de 16.000 ha) alcanzándose una cifra final de 73.500 ha, equivalente a la superficie regada en 1979.

Tras el final de la sequía (1995), la superficie regada volvió a aumentar aunque quedándose lejos de los máximos acaecidos a final de los años 80. El escenario de bombeos de aguas subterráneas se ha mantenido aproximadamente constante desde entonces, habiéndose mantenido a lo largo de estos años los siguientes condicionantes:

- El primer Plan de Compensación de Rentas (1993-1997) fue extendido en 1998, y posteriormente prorrogado otros cinco años en 2003, teniendo un apreciable efecto en la disminución del regadío en la zona.
- La sequía acabó en el año 1995, siendo los años 1996 y 1997 especialmente húmedos. Desde el año 1998 hasta la actualidad no se han vuelto a producir



series de años con precipitaciones extremas ni periodos prolongados de escasez de lluvias.

- El Régimen de Explotación del acuífero de La Mancha Occidental se ha venido aprobando y controlando con carácter anual por parte de la CHG. Si bien, las medidas de control a nivel de explotación resultan aún mejorables, durante estos años la sensación de mayor control por parte de la Administración hídrica ha ayudado a la estabilización de las extracciones.

La estimación de las extracciones de agua subterráneas obtenidas a partir de modelos de flujo hidrológico alimentados con datos de piezometría nos permite conocer la tendencia de las extracciones. No obstante hay que tener en cuenta que estos datos están sujetos a la incertidumbre propia de un proceso de modelización muy complejo que además se alimenta de datos discretos y limitados.

Durante estos años, hay que indicar que se ha producido un progresivo cambio en los tipos de cultivos presentes en la Llanura. Mientras que los cultivos regados durante el verano con elevados consumos de agua han sufrido importantes disminuciones, otros cultivos con menor gasto como los cereales de invierno y especialmente el viñedo en regadío se han extendido de forma considerable.

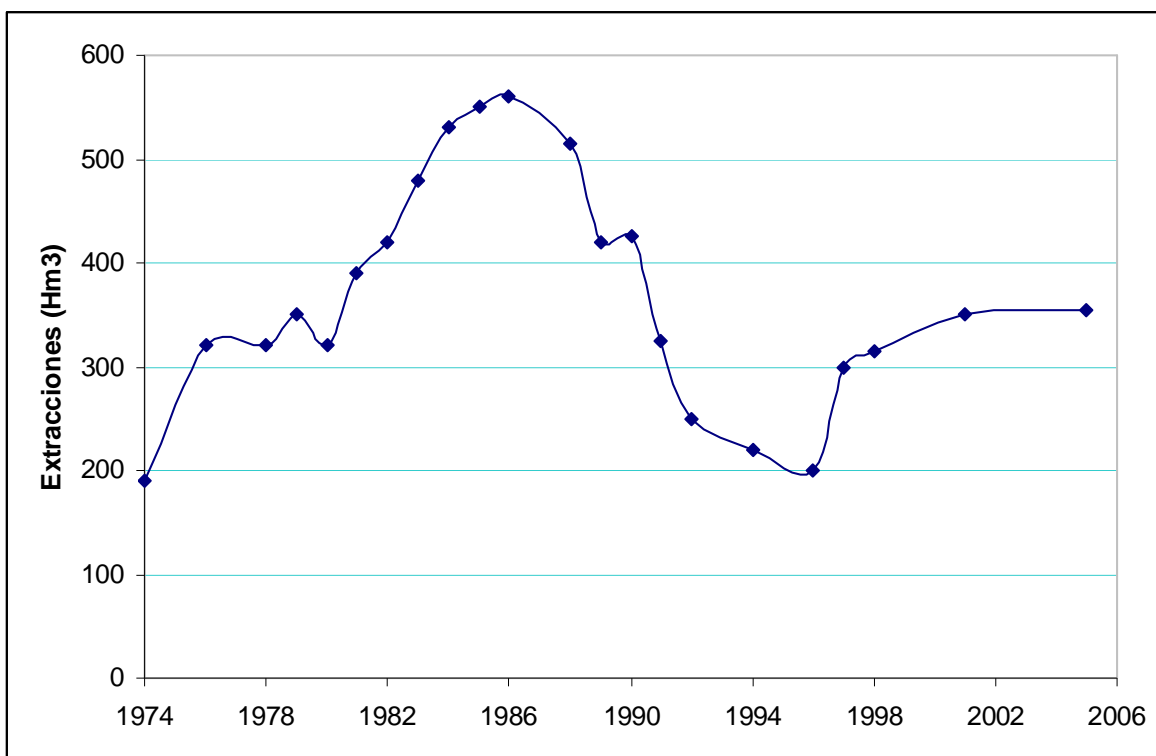


Figura A.14. Evolución estimada de las extracciones de aguas subterráneas ( $\text{hm}^3$ ) en el acuífero de La Mancha Occidental. (Fuente: Martínez-Cortina, 2002 y CHG, 2008)

Además del acuífero de la Llanura Manchega, también el acuífero del Campo de Montiel llegó a sufrir las consecuencias negativas del exceso de extracciones de agua, reduciéndose notablemente las aportaciones naturales de éste a las Lagunas de Ruidera. Las labores de vigilancia y control efectuadas por la Confederación Hidrográfica del Guadiana y la colaboración prestada por los agricultores de la zona permitieron reducir la superficie de riego de unas 4.800 hectáreas en el año 1992 a aproximadamente 1.250 en 1994, con lo que las extracciones de agua del acuífero pasaron de 15,2 hm<sup>3</sup> a finales de la década de los ochenta a 1,6 hm<sup>3</sup> en el último año citado (CHG, 1996b).

Durante estos últimos quince años la situación ha permanecido bajo control, habiendo prácticamente desaparecido del acuífero los cultivos regados de verano, y estando el riego casi monopolizado por cultivos de cereal durante la primavera.

#### **A.2.2.3. Características de los regadíos en la Llanura Manchega y Campo de Montiel**

Los regadíos de la zona se basan en las extracciones de aguas subterráneas de los acuíferos, siendo la superficie atendida con aguas superficiales muy reducida en relación a la regada desde bombeos. Dentro de los acuíferos sobreexplotados, la superficie regada con agua superficial se concentra en la Zona Regable de Peñarroya, cuya superficie potencial de riego (7.000 ha) supone menos de un 5% del total de superficie transformada en regadío dentro de la zona, independientemente de la fuente de datos consultada.

La extracción de agua subterránea resulta ciertamente cara para el agricultor que tiene que realizar bombeos desde muchos metros de profundidad y que por lo tanto se ve obligado a utilizarla con eficiencia, pues cada metro de agua perdido en las redes o por fallos en el riego supone un serio desembolso económico.

Durante los últimos años se han puesto en marcha varias iniciativas para la mejora de regadíos, el asesoramiento de dotaciones necesarias a los regantes y el aumento de la capacitación. A pesar de este hecho, y sobre todo teniendo en cuenta la escasez de recursos existentes, sigue existiendo mucho margen de mejora en la disminución de consumos, que pueden seguir siendo excesivos por deficiencias de las redes de transporte y distribución, así como por un deficiente manejo del agua de riego e inadecuada planificación por parte de algunos usuarios.

En la actualidad, la mayor parte de los riegos se realizan por aspersión y goteo, dependiendo el sistema utilizado del tipo de cultivo.

Una parte de estos riegos se realizan sobre cultivos que son subvencionados mediante la Política Agraria Común (PAC) de la UE, como son los cereales y el maíz. Los cultivos que no reciben ayuda, principalmente viña y hortalizas, sin embargo son comercialmente más rentables, consiguen una mayor productividad con el uso del agua y tienen una mayor

capacidad de incentivar la economía local a través de la generación de empleo directo y de soporte a una industria agroalimentaria asociada.

De hecho, en los informes de apoyo del PEAG se considera que se conseguiría una importante reducción en las extracciones en caso de que las ayudas de la PAC quedasen desvinculadas del tipo de cultivo y se produzca un pago único por superficie, ya que esto redundaría en una mayor eficiencia en el empleo del agua.

Tabla A.10. Tipos de cultivos existentes dentro de los acuíferos sobreexplotados de la Cuenca Alta del Guadiana. (Fuente: elaboración propia a partir de observaciones en campo)

CULTIVO	PERIODO DE RIEGO	TIPO DE RIEGO PREDOMINANTE	IMPORTANCIA SEGÚN EXTENSIÓN OCUPADA
Ajo	Primavera	Aspersión	Abundante
Adormidera	Primavera	Aspersión	Poco representativo
Avena	Primavera	Aspersión	Poco representativo
Cebada	Primavera	Aspersión	Muy Abundante
Guisante	Primavera	Aspersión	Frecuente
Trigo	Primavera	Aspersión	Abundante
Patata	Primavera o Verano	Aspersión	Frecuente
Almendro	Verano	Goteo	Poco representativo
Calabacín	Verano	Aspersión / Goteo	Poco representativo
Cebolla	Verano	Aspersión / Goteo	Abundante
Girasol	Verano	Aspersión	Frecuente
Maíz	Verano	Aspersión / Goteo	Abundante
Melón	Verano	Goteo	Abundante
Olivo	Verano	Goteo	Frecuente
Pimiento	Verano	Aspersión / Goteo	Frecuente
Pistacho	Verano	Goteo	Poco representativo
Remolacha	Verano	Aspersión	Poco representativo
Sandía	Verano	Goteo	Frecuente
Tomate	Verano	Aspersión / Goteo	Poco representativo
Viña	Verano	Goteo	Muy Abundante
Otras hortalizas	Verano	Aspersión / Goteo	Poco representativo
Alfalfa	Primavera y Verano	Aspersión	Frecuente
Prados	Primavera y Verano	Aspersión	Poco representativo

Sin embargo, el esfuerzo por llegar a un uso más correcto del agua extraída no está sirviendo por sí solo para alcanzar una adecuada explotación de los recursos subterráneos. La situación de sobreexplotación a la que se ha llegado, con extracciones

medias tan desorbitadas que llegaron a doblar el recurso medio renovable, ha causado un problema global de difícil solución, ya que se ha producido un vaciado progresivo de los acuíferos, principalmente del de La Mancha Occidental, lo que ha conllevado una serie de graves consecuencias.

Así los descensos de los niveles freáticos han obligado a reducir el número de hectáreas regadas en los bordes del acuífero, agotando asimismo los pozos someros o poco profundos. Este hecho se ve contrarrestado con una proliferación desmesurada de sondeos en la parte central del acuífero. Además se ha producido la consiguiente disminución de los niveles de agua de los pozos y la alteración de las salidas naturales del sistema con todo el problema ambiental que este hecho acarrea, como por ejemplo la desecación y desaparición de lagunas y zonas encharcadas de importancia ecológica reconocida.

La demanda de los regadíos con agua subterránea se halla bien lejos de verse satisfecha, lo que ha obligado a la Administración a la adopción de medidas correctoras sobre la ampliación de la superficie regada, limitando las cantidades a extraer para el riego, de donde se deduce una menor dotación asignada a los diferentes cultivos y una reorientación a cultivos que consuman menor cantidad de agua. Desde el momento de máximas extracciones, el consumo de agua se ha visto reducido considerablemente a pesar de haberse mantenido gran parte de la superficie cultivada. Cultivos industriales como la alfalfa, la remolacha, el girasol o el maíz, que requieren mucho agua, han sufrido significativos descensos en cuanto a su superficie mientras que otros, que necesitan de dotaciones de riego mucho más reducidas como el cereal de primavera y la vid, han sufrido una fuerte expansión.

La sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos supone un importante factor de peligro para la sostenibilidad de los regadíos, afectando además a las dotaciones de uso y tipo de cultivos existentes.

Esta situación incorpora al análisis el componente económico ligado a la inversión realizada por los agricultores para la transformación de terrenos agrícolas de secano a regadío. La práctica totalidad de la superficie regada en la Mancha ha sido transformada a partir de iniciativas privadas de pequeños agricultores, muchos de los cuales no lo son a Título Principal (Serna y Gaviria, 1995), sino que pertenecen a familias que se dedican a otras actividades y encuentran en la agricultura de regadío un apoyo en su economía. La inversión llevada a cabo por estos agricultores ha sido muy considerable y ha implicado un importante esfuerzo en relación a su poder adquisitivo. Esto motiva que a pesar del problema hídrico y de la vulnerabilidad de la situación de los regadíos, muchos agricultores se vean empujados a continuar regando por la necesidad de amortizar y sacar rendimiento a su inversión, buscando resolver su propio problema y despreciando el problema global creado.

Por último, y manteniendo el enfoque de sostenibilidad de los regadíos, hay que mencionar los efectos que la intensificación agraria está teniendo sobre la estructura edáfica.

Un aspecto a estudiar es la progresiva salinización que se está produciendo en las tierras de cultivo de la llanura ante la proliferación de los regadíos intensivos con aguas subterráneas ricas en sales. Cuando se produce un sobreencharcamiento en un terreno y el agua contiene sales disueltas, éstas precipitan o pasan a formar parte de la solución del suelo. Si este fenómeno se repite con demasiada frecuencia e intensidad se incrementa con rapidez la salinidad de los suelos, aumentando el esfuerzo osmótico que deben hacer las plantas para incorporar los nutrientes a través de sus raíces, por lo que disminuye el rendimiento de los cultivos.

Por otro lado, la aplicación de abundantes cantidades de fertilizantes fosfatados y nitrogenados así como de productos fitosanitarios puede llegar a alterar a nivel local y global la calidad de las aguas subterráneas, afectando gravemente la capacidad del recurso para atender a otros posibles usos como su uso ecológico, para abastecimiento e incluso al industrial.

#### **A.2.2.4. Importancia del sector agrícola en la Llanura Manchega**

Dentro del marco de reducido desarrollo de la actividad industrial y del sector turístico, comentado en el apartado A.1.3., el sector primario y en concreto la agricultura se manifiesta como el principal motor económico de la zona.

El significativo desarrollo de la agricultura de regadío ha originado un importante impulso económico para la región a costa de la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos por lo que una inadecuada gestión de los mismos como la que se ha estado produciendo no es sustentable en el tiempo (Sanz, 1999), y por lo tanto este impulso no se puede mantener por muchos años.

El sector agrícola, en el que tradicionalmente se ha sustentado la economía de la región, ha sufrido en las tres últimas décadas profundas modificaciones a raíz de la generalización de la puesta en regadío de numerosas parcelas. Este crecimiento de los regadíos se ha apoyado casi exclusivamente en un aumento de las extracciones de aguas subterráneas de la zona, especialmente del acuífero de las Mancha Occidental, lo que ha supuesto una reducción significativa de las reservas del mismo, al haber excedido los bombeos de agua ampliamente los límites permisibles para mantener los recursos hídricos del mismo (Cruces y Martínez-Cortina, 2000).

Respecto al sector agrícola, el principal inconveniente que supone el alto ritmo de agotamiento de los recursos hídricos es la imposibilidad de consolidación de los regadíos existentes. La declaración de sobreexplotación de las unidades 04.04 y 04.06, supuso un primer paso en el control y regulación de este proceso, al limitarse seriamente las

extracciones dependiendo del tipo de cultivo y del tamaño de las parcelas. En esta línea se está intentando controlar de una manera eficaz, tanto el cumplimiento del régimen de explotación impuesto por la Confederación sobre los regadíos permitidos como la no proliferación del riego a partir de pozos ilegales. De esta manera se intenta que aquellos propietarios que han adquirido para sus parcelas los permisos necesarios para ponerlas en regadío puedan seguir con su actividad, consiguiendo al mismo tiempo un manejo mucho más adecuado de los recursos hídricos subterráneos. No obstante el problema de vulnerabilidad creado en una agricultura que depende de la explotación de recursos fósiles del subsuelo persiste.

La actividad del regadío se ha constituido en una nueva fuente de riqueza para la región al introducir cultivos de alta rentabilidad y mejorar las cosechas de otros ya existentes. Los efectos más inmediatos de su instauración en la zona han sido un aumento de las rentas medias y un claro efecto consolidante respecto a la estabilización de la población, atacando a algunos de los problemas tradicionales de la zona como la falta de trabajo y la emigración a las grandes ciudades.

Sin embargo, ha quedado demostrado que el crecimiento económico a medio y largo plazo de esta área no puede depender de la agricultura en regadío a partir de las aguas de los acuíferos de la zona, ya que se ha llegado a una situación que resulta claramente insostenible en el tiempo.

En estos momentos, muchos de los pueblos de La Mancha Occidental se hallan en lo que podríamos considerar como el mejor momento de su historia desde un punto de vista económico y social, aunque por otro lado la Llanura Manchega se encuentra en la situación ecológica más grave y dramática que nunca se haya conocido (Serna y Gaviria, 1995). Esta afirmación resume mejor que ninguna otra tanto la importancia que el regadío ha tenido en el desarrollo de la zona como las consecuencias que este crecimiento ha causado sobre las características del territorio.

### **A.2.3. Problemática por la sobreexplotación de los acuíferos**

Comparativamente a su superficie, la Cuenca Alta del Guadiana es una de las regiones con mayor escasez de agua de la Península, debido a que las características climáticas de la región dan lugar a que los recursos hídricos potenciales con los que cuenta sean muy reducidos.

Este volumen de recursos hídricos se caracteriza por una marcada irregularidad temporal, tanto dentro del mismo año hidrológico, con un período estival en que los ríos y arroyos están prácticamente secos, como dentro de un período de varios años en los que aparecen épocas de acusada sequía.

La región posee una característica singular; la presencia del acuífero de la Llanura Manchega, que se extiende ocupando una superficie del orden de 5.500 km<sup>2</sup> y que constituye la pieza clave del sistema hidrológico de la Cuenca Alta del Guadiana.

Los recursos medios renovables del acuífero se han estimado en torno al 65% de los existentes en la región (CHG, 1993) constituyendo su recurso mayoritario. Este acuífero se encuentra íntimamente asociado al del Campo de Montiel, el siguiente en cuanto a importancia en la región, y a la unidad de la Sierra de Altomira.

La explotación en estas últimas décadas de estos acuíferos con destino fundamentalmente a la agricultura de regadío ha superado ampliamente los recursos renovables estimados, provocando un descenso general de los niveles piezométricos y el agotamiento en ciertas zonas de los acuíferos, con repercusiones económicas negativas. Por otra parte, la disminución del drenaje natural del sistema ha ocasionado graves perjuicios ecológicos para las zonas húmedas, especialmente para el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel.

#### **A.2.3.1. Balances hídricos de los sistemas hidrogeológicos sobreexplotados: causas y efectos de su alteración**

Para explicar y cuantificar los efectos que el aumento de las extracciones ha podido causar resulta necesario profundizar en el conocimiento del acuífero de la Llanura Manchega, dado que es a través de esta unidad donde se realiza toda la descarga de la Cuenca Alta. Esto exige, como tarea previa a cualquier otra, disponer de un esquema de funcionamiento en el que se expresen debidamente cuantificados los distintos flujos de entradas y salidas; es decir, un balance hídrico del sistema.

Este estudio global presenta algunas dificultades: la gran extensión del acuífero subterráneo, su elevada capacidad de almacenamiento de agua que hace que las variaciones anuales queden difuminadas ante el gran volumen regulador, las complejas relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas de la zona, el acelerado crecimiento de las extracciones de agua en los últimos años... A todo esto hay que añadir, que buena parte de los datos disponibles presentan algunos problemas de coherencia, tienen que ser medidos de forma indirecta y, en bastantes ocasiones, se refieren a periodos distintos (SGDGOH, 1988).

Los elementos que conforman de forma muy genérica el balance hídrico del acuífero se presentan a continuación.





Figura A.15. Elementos a considerar en el balance hídrico (Fuente: Elaboración propia)

La recarga por infiltración se produce de forma bastante irregular debido a la escasez de precipitaciones y a su distribución repartida a lo largo del año. Existen series apreciablemente largas de años en las que no se produce infiltración o ésta es de muy baja cuantía.

La recarga a través de aguas superficiales se produce fundamentalmente a partir de los tres ríos de mayor caudal que llegan al acuífero. Los ríos Záncara y Gigüela responden con rapidez a los regímenes de lluvias, por lo que a pesar de presentar caudales muy irregulares son capaces de aportar del orden de  $100 \text{ hm}^3$  anuales cada uno de ellos. Por su parte, la aportación estimada del Pinilla, antes de la construcción del embalse de Peñarroya, se cifraba en una cantidad similar (Cruces y Martínez Cortina, 2000). La escorrentía superficial dentro del acuífero de La Mancha es prácticamente nula, debido a la reducida pluviometría y a la elevada permeabilidad del terreno en la llanura cuyo efecto potencia la casi inapreciable pendiente. En régimen natural, al atravesar las zonas de acuíferos los ríos de la cuenca tienen una profunda interrelación con los acuíferos pudiéndose comportar como ganadores o perdedores dependiendo de la zona así como de si nos encontramos en un periodo seco o húmedo dentro del año o dentro de una serie interanual (Fernández Lop, 1996).

En relación a las aguas subterráneas, aunque los límites geológicos y las interacciones resultan complejas, se sabe que las unidades hidrogeológicas adyacentes a La Mancha Occidental alimentan a ésta con un flujo estimado de  $10 \text{ hm}^3/\text{año}$  en el caso de la unidad de la Sierra de Altomira y  $50 \text{ hm}^3/\text{año}$  desde el Campo de Montiel (Llamas y Martínez-Santos, 2005). El acuífero de La Mancha se encuentra también en relación con la divisoria de cuenca del Júcar, manteniendo una zona de contacto que se desplaza a lo largo del tiempo dependiendo de las variaciones piezométricas (Martínez-Cortina y Cruces, 2005) y que en función de este equilibrio puede llegar a convertirse en una zona de descarga hacia la cuenca vecina (CHG, 2008).

Teniendo en cuenta todos estos datos, el parámetro fundamental para el cálculo del balance es la recarga media, que resulta uno de los datos más difíciles de estimar, ya que no puede medirse directamente sino a través de otros datos indirectos, a su vez sujetos a un serio grado de incertidumbre. Los datos disponibles se basan en datos de aforo y

medidas de evapotranspiración. Las primeras estimaciones fueron realizadas por el SGOP a finales de los 70, cifrándose en torno a 50 mm/año (SGOP, 1979), teniendo en cuenta que existen años con recarga nula o muy poco significativa. Este dato coincidió con el suministrado por el MOPTMA en 1994. El IGME (1981) calculó la recarga media en 42 mm/año para el acuífero de La Mancha Occidental y en 52 mm/año para el acuífero del Campo de Montiel. Un estudio de mayor detalle ha sido llevado a cabo dentro del proyecto EFEDA (Cruces *et al*, 1998), en el que se constató una elevada variabilidad espacial en los datos de recarga, que oscilan entre un valor negativo de 10 mm y un máximo de 200 mm anuales. El valor medio aproximado de recarga para el total del acuífero se estima en 200 hm<sup>3</sup> en años secos y sube hasta los 500 hm<sup>3</sup> en años húmedos (Martínez Cortina y Cruces, 2003), aunque hay que seguir teniendo en cuenta la complejidad de estimación y la propia heterogeneidad espacial del dato.

En condiciones naturales, la evaporación directa en las zonas húmedas situadas dentro del acuífero de La Mancha Occidental se estima en un valor medio anual de 125 hm<sup>3</sup>, si bien esta medida resulta variable al depender directamente de la superficie encharcada cada año (Bromley *et al*, 2001).

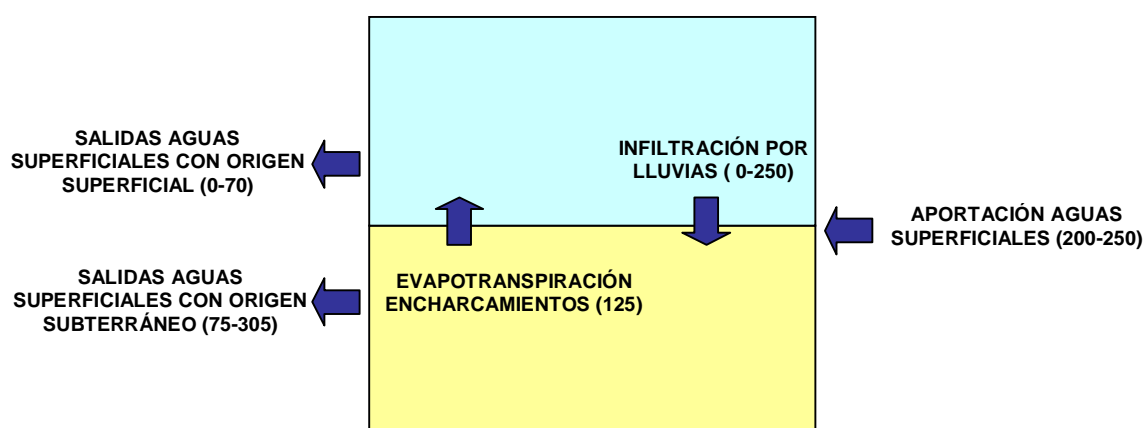


Figura A.16. Balance hídrico del acuífero de la Llanura Manchega en régimen natural. Datos en hm<sup>3</sup>/año (Fuente: elaboración propia a partir de datos CHG y Martínez Cortina, 2002)

Se observan unas salidas naturales variables, que para el caso del conjunto de la Cuenca Alta del Guadiana se estimaron en 400 hm<sup>3</sup>/año para el periodo 1931/1971, (SGOP, 1982) y en una cifra similar para el periodo 1943/1974 (Bromley *et al*, 1996), en periodos en donde el impacto de las extracciones era aún muy reducido. El segundo estudio citado cifra la cantidad media aportada por los sistemas acuíferos en 300 hm<sup>3</sup>/año, aunque la variabilidad del dato es muy importante, oscilando entre los 68 y 864 hm<sup>3</sup> anuales. Esta variabilidad se produce entre años e igualmente a lo largo de cada año hidrológico, mostrando los datos de aforo periodos de semanas e incluso de meses en los que se producen las salidas del sistema.

El ecosistema constituido por las Tablas de Daimiel ocupa, desde un punto de vista hidrológico, una situación clave: en él confluyen la red hidrológica superficial de la Cuenca Alta del Guadiana (15.000 km<sup>2</sup> de área de drenaje) y las salidas naturales del gran embalse subterráneo de la Llanura Manchega; es decir, el marco físico de este ecosistema se origina precisamente en la confluencia de estos dos sistemas hidrológicos, con un equilibrio de aportaciones superficiales y subterráneas, y de aguas de calidades diferentes, lo que le confiere especiales características de fragilidad.

Así pues, cualquier perturbación que se produzca en alguno de estos dos grandes sistemas hidrológicos; en forma de toma directa de los ríos, extracciones de aguas subterráneas o modificación de la calidad de vertido por poner algunos ejemplos, repercutirá, en un plazo más o menos largo, en la zona de las Tablas, por donde inevitablemente debería discurrir el volumen de agua detraído si no hubiese aparecido ninguna alteración, existiendo una relación diáfana entre el estado del sistema general y la situación hídrica de las Tablas (SGOP, 1983).

Una característica que destaca del embalse subterráneo es la gran inercia de comportamiento que imprime al sistema el hecho de que el volumen de agua almacenada sea tan elevado; del orden de unas 100 veces superior a la recarga media anual (SGGOPH, 1988). Esto origina que los efectos de las distintas acciones a las que se encuentra sometido se manifiesten de una forma lenta y en periodos de tiempo generalmente amplios, de manera que incluso puede darse el caso de que los efectos derivados de alguna alteración salgan a la luz años después de haber cesado la causa que los originó.

Las principales causas de modificación del balance hídrico del embalse subterráneo han sido (SGDGOH, 1988) el descenso del cauce de los ríos debido a obras de drenaje y profundización artificial, y fundamentalmente, las extracciones efectuadas en diferentes localizaciones del mismo para su aplicación al regadío.

En el acuífero de La Mancha Occidental, la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos para regadío ha puesto de manifiesto una disminución de los recursos almacenados del orden de entre 3.000 y 3.500 hm<sup>3</sup>, desde 1974 hasta el año 2009, déficit provocado por la sobreexplotación del mismo (CHG, 2008; CHG, 2009). El último año hidrológico (2009-2010) ha sido excepcionalmente húmedo, lo que ha permitido la recuperación de las reservas hasta los 2.500 hm<sup>3</sup> (según datos presentados públicamente por el Consorcio del Alto Guadiana). Según otros autores, el vaciado del acuífero podría estimarse entre 3.000 y 5.000 hm<sup>3</sup> (López-Geta *et al*, 2006). Las principales consecuencias derivadas del alto volumen de agua extraído son las siguientes (SGDGOH, 1988):

- Descenso continuado de los niveles de agua en el embalse subterráneo, lo que ha producido el agotamiento de los recursos hídricos en determinadas zonas con una incidencia económico - social negativa de la mayor importancia.

- Disminución de las salidas naturales del embalse subterráneo en la zona de los Ojos del Guadiana y las Tablas, así como la transformación de estas zonas desde drenajes del acuífero a puntos sumideros. Esto trae consigo una inmediata repercusión sobre el equilibrio de niveles superficiales y subterráneos de estas áreas, apareciendo un drenaje de la lámina de agua superficial hacia el subsuelo permeable, con la consiguiente desaparición de las Tablas cuando se producen periodos considerables de estiaje.
- Disminución de los caudales circulantes por el Guadiana aguas debajo de la zona de las Tablas, con afección a los usuarios actuales y futuros.

El análisis del estado de los niveles del acuífero a lo largo del tiempo es llevado a cabo a partir del análisis de piezómetros, existiendo dos redes complementarias gestionadas por el IGME y la CHG.

Dentro del PEAG, y basándose en datos del inventario existente de más de 10.000 norias, en registros de aforos, en la distribución de manantiales conocidos y en el catálogo de humedales (teniendo en cuenta tanto los funcionales en la actualidad como aquellos de los que se conoce su presencia histórica), se ha realizado un mapa de piezometría del acuífero de La Mancha Occidental en estado no alterado. En este mapa se observa la existencia de un flujo en régimen natural de este a oeste con salidas a través de los ríos Gigüela y Guadiana.

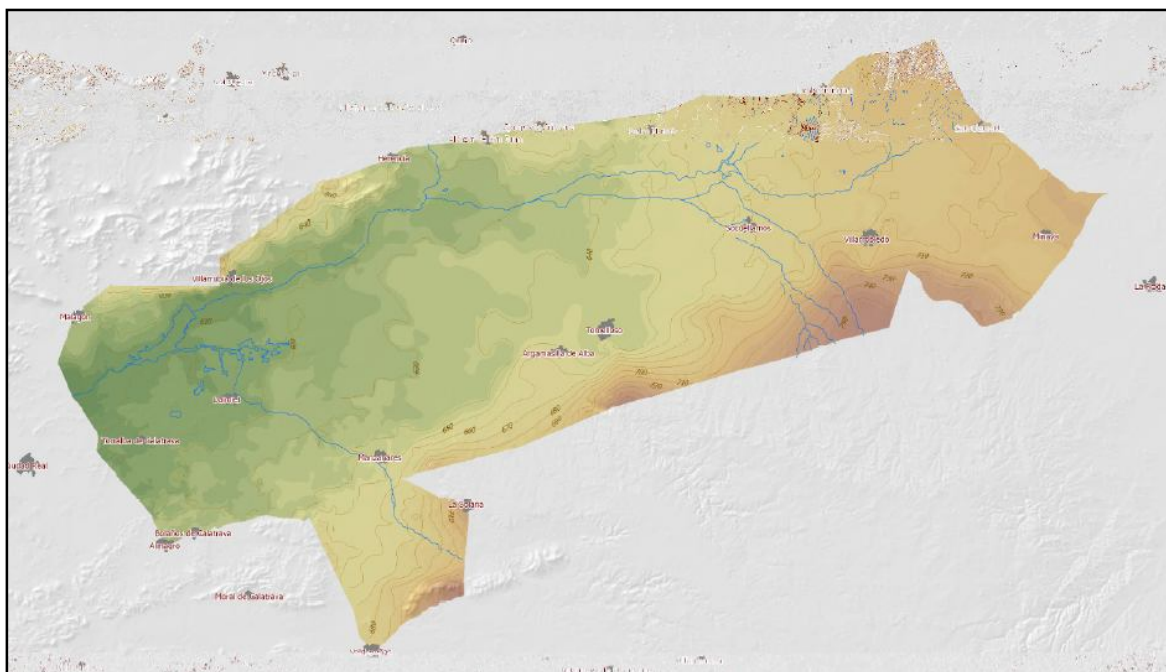


Figura A.17. Niveles piezométricos del acuífero de La Mancha Occidental en régimen natural (Fuente: CHG, 2008)

Los efectos de la sobreexplotación se han hecho notar visiblemente sobre los niveles piezométricos del acuífero, formándose dos importantes conos de bombeo en la zona oeste (Daimiel) y en la zona central (con centro en los Llanos del Caudillo). Además, en la zona este se observa como la alteración de los niveles produce un flujo hacia la cuenca del Júcar, que drena parte de los recursos subterráneos.

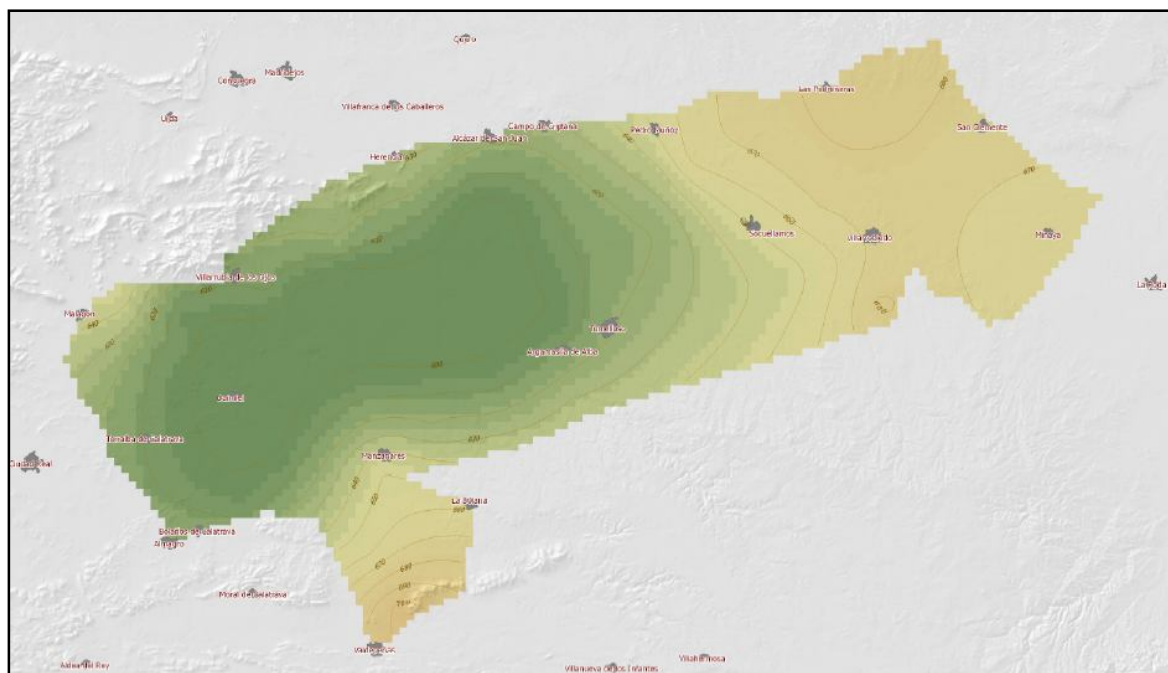


Figura A.18. Niveles piezométricos del acuífero de La Mancha Occidental en 2006 (Fuente: CHG, 2008)

El balance hídrico original del acuífero se ha visto por tanto intensamente alterado, modificándose tanto algunos de los flujos de entrada como principalmente los flujos de salida, donde las extracciones de aguas subterráneas han sustituido casi por completo a las salidas naturales del sistema.

La evaporación directa anual desde las zonas encharcadas en régimen natural en la Cuenca Alta se estima entre 125 y 175 hm<sup>3</sup>, aunque la dramática desaparición de humedales sucedida ha supuesto que la pérdida de agua hacia la atmósfera se reduzca hasta los 50 hm<sup>3</sup> (aproximadamente 10 hm<sup>3</sup> dentro de La Mancha Occidental). La consecuencia directa es que los recursos renovables disponibles se han elevado desde los 260-300 hm<sup>3</sup>/año en condiciones naturales hasta los 385-425 hm<sup>3</sup>/año en la situación presente (Martínez Cortina, 2002).



Figura A.19. Balance hídrico del acuífero de la Llanura Manchega en la actualidad. Datos en  $\text{hm}^3/\text{año}$   
(Fuente: elaboración propia a partir de datos CHG y Martínez Cortina, 2002)

El balance hídrico muestra un estado de meta-equilibrio donde dependiendo de la tasa de recarga del año, se producirá un llenado o vaciado del sistema acuífero, aunque la recuperación del mismo parece claro que no se producirá si no se lleva a cabo una reducción de las extracciones para regadío. No obstante, este parámetro está sujeto en la actualidad a un elevado grado de incertidumbre, siendo necesario un dato de consenso acerca de cual está siendo el nivel de las extracciones para poder avanzar hacia una gestión más adecuada de los recursos hídricos (Llamas y Martínez Santos, 2005).

#### A.2.3.2. El problema ecológico y socioeconómico de la Mancha

El modelo basado en el crecimiento de la agricultura de regadío ha implicado un desarrollo económico y social desconocido hasta el momento en muchos municipios de la región. Sin embargo, las consecuencias de la ausencia de control y planificación previa sobre el proceso de transformación de cultivos y el aumento de las extracciones ha tenido graves consecuencias sobre el patrimonio natural de la zona, de gran importancia desde un punto de vista ecológico a nivel nacional e incluso internacional. En adición, el modelo no resulta sostenible, al basarse en la explotación de recursos limitados que han sido consumidos de forma desordenada.

El punto de partida de la problemática actual comenzó con la aprobación de una Ley en 1956, que promovió las obras de desecación de zonas húmedas asociadas a los ríos Záncara, Gigüela y Guadiana, y que se realizaron al final de los años 60 y principios de la década de los 70, centradas en el drenaje y profundización de cauces. Los efectos que tuvieron estos proyectos fueron amplificados por el desarrollismo iniciado en los años 70, en el afán de transformar en regadío por iniciativa privada toda finca que las ayudas de la administración agraria y la tecnología de las bombas sumergidas permitía en la comarca de la Mancha.

Las administraciones con competencias directas o indirectas en materia agraria e hídrica quedaron desbordadas, existiendo además una descoordinación evidente por la

inexistencia de un organismo encargado de la gestión hídrica de las aguas del subsuelo. A pesar de que observando la evolución de las superficies transformadas en regadío se hicieron varios informes por distintos organismos oficiales avisando de los peligros existentes, la dinámica de las extracciones no fue ordenada.

A mediados de la década de los setenta se llegaron a extraer de forma mantenida recursos hídricos en cantidad superior a la capacidad de recarga del acuífero, lo que condujo a que fueran cada vez mayores los tramos de la red hidrográfica asociada al acuífero de La Mancha Occidental por los que no circulaba agua o lo hacía en cuantías y periodos decrecientes con el paso de los años. Finalmente, el rebosadero natural del acuífero, los Ojos del Guadiana, dejó de ejercer su función. Además los aportes del Gigüela empezaron a ser igualmente decrecientes resultando finalmente afectados los humedales anejos a los cauces y el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel que recibían menos o ninguna cantidad de agua, empeorándose por otro lado la calidad de las existentes (CHG, 1996).

Las obras de encauzamiento de ambos ríos en la Cuenca Alta y la desaparición de las márgenes que se inundaban regularmente propiciaron la transformación de dichos terrenos primero, en fértiles secanos y posteriormente algunos de ellos en regadíos, en una superficie próxima a las 30.000 ha. Por otro lado también aumentó enormemente el número de hectáreas regadas con aguas subterráneas llegándose a los extremos de que a finales de los 80 los recursos hídricos extraídos del subsuelo llegaron casi al doble de los recursos renovables medios del citado acuífero (Cruces y Martínez-Cortina, 2000), creando un vaciado del acuífero que continua existiendo en la actualidad.

Paralelamente la transformación de amplias zonas de monte y de ribera en grandes explotaciones de regadío, fundamentalmente en el periodo 1984 - 1987, con la subsiguiente alteración provocada en el régimen hídrico de la zona, originó serios problemas en el acuífero del Campo de Montiel. Estos problemas se centraron en un descenso acusado de los niveles de las Lagunas de Ruidera, descenso que se acentuó con el periodo de sequía acaecido en la primera mitad de la década de los 90. Aunque actualmente los niveles se han recuperado, estos descensos, unidos a la contaminación de las aguas han producido un impacto considerable sobre las barreras travertínicas que originan y permiten la existencia de las lagunas.

Ante la situación de uso descontrolado de los recursos, la Administración Hidráulica declaró sobreexplotados ambos acuíferos tras la entrada en vigor de la Ley de Aguas de 1985 y estableció Regímenes de Explotación para los mismos que intentaron mantener un equilibrio entre las extracciones anuales y los recursos medios de ambos. Otras medidas, como los sucesivos Planes de Compensación de Rentas por el abandono del regadío o los programas de mejora de regadíos han colaborado a la estabilización de las extracciones.

Los efectos más relevantes causados por el aumento del regadío han sido (CHG, 1996):



a) Ecológicos:

- disminución de caudales circulantes por los cauces, y de superficies cubiertas por las aguas en los humedales
- afección al ecosistema del Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel y a varias de las lagunas del Parque Natural de Ruidera,
- disminución de la calidad de las aguas subterráneas,
- pérdida de ecosistemas, con especial relevancia para algunas especies.

b) Económico - sociales: el desarrollo alcanzado en la década de los 80 era insostenible y dejó a la agricultura de regadío tradicional, basada en las miles de norias manchegas, al margen de la actividad, desplazándose las zonas de regadío hacia el centro y nordeste del acuífero. El efecto inmediato fue muy positivo para la economía agrícola pues los nuevos cultivos introducidos produjeron rentabilidades muy altas que mejoraron la posición social del estrato poblacional rural vinculado directa o indirectamente con estas actividades. Sin embargo la sobreexplotación del acuífero supone un aumento cada vez mayor de los costes de extracción del agua.

Los posteriores conflictos derivados del descenso de los niveles piezométricos y de la ausencia de agua en cada vez más áreas del acuífero, la aparición de zonas con limitación de las extracciones y de medidas incentivadoras de la eficacia en el riego, conjuntamente con las sanciones a los incumplimientos de las normas han hecho disminuir el consumo de agua e iniciar tímidas reorientaciones de la agricultura hacia otras producciones con efectos de desactivación en los sectores asociados al regadío.

Otros problemas hídricos que se plantean en la Llanura Manchega y a los que, igualmente, hay que dedicar atención son los siguientes:

- Abastecimiento a poblaciones: casi la totalidad de las poblaciones de la región están abastecidas con aguas subterráneas. Los problemas de descensos de niveles afectan a las captaciones municipales, por lo que se han aparecido problemas para el abastecimiento en algunas de estas localidades. Por otra parte el agua para abastecimiento actual presenta en algunos casos una mineralización excesiva, que la hace no conveniente para el consumo humano, cuando no im potable.
- Contaminación de los acuíferos: el principal problema al que se enfrenta la calidad de las aguas subterráneas es la contaminación por nitratos, en su mayoría procedentes de las prácticas de fertilización agrícola. Además al tratarse de acuíferos muy vulnerables a la contaminación, es muy probable que el contenido en los mismos vaya aumentando irreversiblemente.
- Control de los vertidos: el vertido de las aguas residuales sin depurar contribuye fuertemente a que los ríos de la cuenca presenten niveles medios de contaminación con el consiguiente problema sanitario. Esta contaminación de los ríos ha obligado

en los casos más graves a que algunos municipios se hayan vistos forzados a renunciar a la captación de aguas de cauces muy próximos y hayan tenido que proceder a la captación de aguas de otras fuentes (manantiales, pozos, sondeos, etc.) más lejanas y costosas. En los últimos años han empezado a hacer acto de presencia las estaciones depuradoras de aguas residuales con lo que el problema ha evolucionado muy favorablemente.

#### **A.2.4. Consecuencias de la sobreexplotación sobre las zonas húmedas**

Las zonas húmedas se definen, según la Ley de Aguas, como zonas pantanosas o encharcadizas, de origen tanto natural como artificial. Dentro de ellas se incluyen las marismas, turberas o aguas rasas, permanentes o temporales, ya sean dulces, salobres o salinas, naturales o artificiales. A su vez, también se incluyen en la definición de humedal las márgenes de dichas aguas y las tierras limítrofes en los casos en que esto sea pertinente para la protección de la flora y fauna.

Estas zonas han sido tradicionalmente consideradas como áreas inhóspitas, poco rentables e insalubres (focos de paludismo) y por tanto lo mejor que se podía hacer con ellas era ocuparlas y ponerlas en cultivo. Esta mentalidad tenía un fiel reflejo en la legislación vigente, que incluso primaba la desecación y el "saneamiento" de los humedales.

Hoy en día estas aseveraciones han sido superadas y la importancia de las zonas húmedas se encuentra respaldada por sólidos argumentos ecológicos, biológicos, económicos, estéticos y conservacionistas. Este cambio en la visión de la importancia de los humedales se plasmó en la celebración de la "Convención sobre Zonas Húmedas de interés internacional, especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas", más conocida como la Convención de Ramsar, y que fue aprobada en esta ciudad el 2 de febrero de 1971, actuando la UNESCO como organismo depositario. Sus conclusiones se centran en evitar la progresiva ocupación y desaparición de las zonas húmedas, promoviendo la conservación de sus valores naturales y de sus diversas funciones y actuando no sólo a una escala local y nacional, sino fundamentalmente de una forma global. España se adhirió a este convenio en 1982, siendo las Tablas de Daimiel y las Lagunas Manchegas, una de las cuatro zonas húmedas que se creyó oportuno proteger dentro del marco del mismo.

Las Tablas ya habían sido previamente declaradas Parque Nacional en 1973, de acuerdo al decreto 1874/1973 de 28 de junio, lo que otorga a este espacio el rango más alto establecido dentro de la legislación española en cuanto a interés en la protección de su patrimonio natural. Dentro del texto del decreto se afirma que *"con la creación del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel se pretende asegurar con visión de futuro y en*

*beneficio de toda la comunidad, la conservación de uno de los ecosistemas más valiosos del territorio nacional y el más representativo de las zonas húmedas de la Mancha. De forma simultánea se asegurará igualmente la pervivencia de la selecta avifauna que utiliza esta zona como área de descanso, invernada o puesta.”*

Dentro de la Cuenca Alta encontramos otra zona húmeda gestionada bajo la figura de espacio protegido de “Parque”, el Parque Natural de la Lagunas de Ruidera, entre las provincias de Ciudad Real y Albacete, declarado en 1979 mediante Real Decreto Legislativo RDL 2610/1979 de 13 de julio.

Además, hay que tener en cuenta la legislación europea, estando en vigor la Directiva 92/43/CEE (Directiva Hábitat) relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la flora y fauna silvestres. Esta Directiva promulga la elaboración de una red europea de espacios protegidos denominada Red Natura 2000 que estará formada por un conjunto de áreas denominadas ZEC (Zonas de Especial Conservación) que garantice la protección de la biodiversidad existente dentro del continente.

En el momento actual, existe una propuesta de espacios que, al albergar los hábitats naturales de mayor interés, han sido clasificados como Lugares de Importancia Comunitaria (LIC), y que están a la espera de su designación definitiva como ZEC. Dentro de esta última figura también se integrarán las Zonas de Especial Protección para las Aves (ZEPA) establecidas en virtud de la Directiva Aves (Directiva 79/409/CEE).

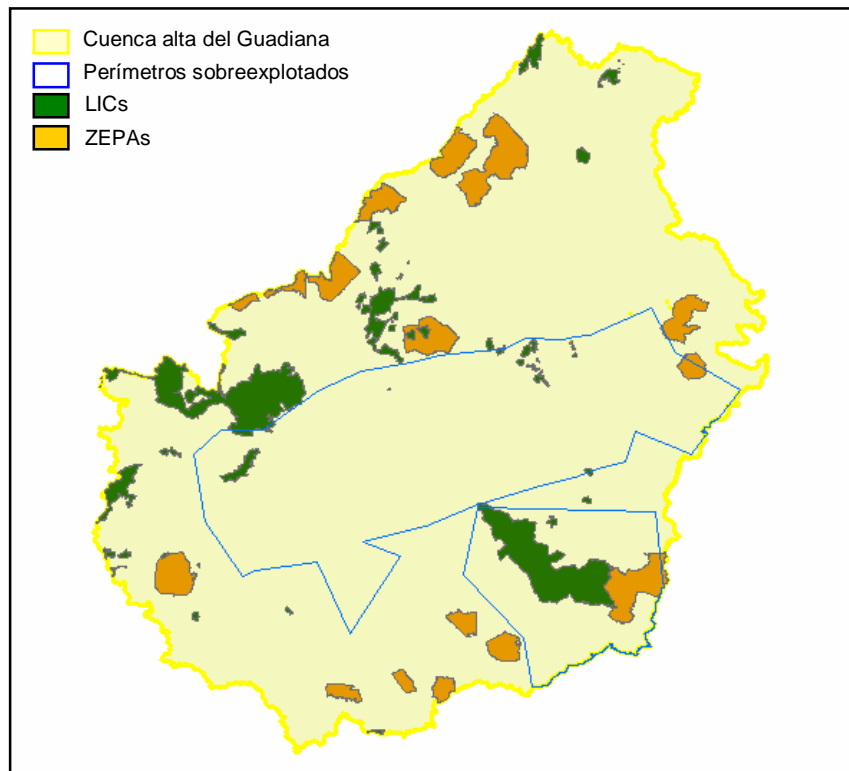


Figura A.20. Delimitación de LICs y ZEPAs dentro de la Cuenca Alta del Guadiana

El listado de LICs y ZEPAs dentro de la Cuenca Alta del Guadiana resulta amplio, encontrándose muchos de estos espacios ligados directamente a la presencia de agua.

Tabla A. 11. Espacios naturales de la Cuenca Alta del Guadiana incluidos dentro de la propuesta de Red Natura 2000. En color azul se indican aquellos ligados a zonas húmedas.

Nombre del espacio	Tipo de protección	Provincia	Superficie dentro de la Cuenca Alta (ha)
Área esteparia de la Mancha Norte	ZEPA	Ciudad Real, Cuenca y Toledo	50.344,0
Áreas esteparias del campo de Montiel	ZEPA	Ciudad Real	15.428,2
Campo de Calatrava	ZEPA	Ciudad Real	8.978,4
Estepas Yesosas de la Alcarria Conquense	LIC	Cuenca	1.224,7
Humedales de la Mancha	LIC y ZEPA	Ciudad Real, Cuenca y Toledo	14.615,9
La Encantada, el Moral y los Torreones	LIC	Albacete	854,6
Laguna de El Hito	LIC y ZEPA	Cuenca	1.001,4
Lagunas de Ruidera	LIC	Albacete y Ciudad Real	34.451,8
Lagunas Volcánicas del Campo de Calatrava	LIC	Ciudad Real	1.379,4
Montes de Toledo	LIC y ZEPA	Ciudad Real y Toledo	37.842,1
Navas de Malagón	LIC y ZEPA	Ciudad Real	466,3
Ríos de la Cuenca Media del Guadiana y Laderas Vertientes	LIC y ZEPA	Ciudad Real y Toledo	154,7
San Clemente	ZEPA	Cuenca	10.678,0
Sierra de Altomira	LIC y ZEPA	Cuenca y Guadalajara	2.432,4
Sierra de Picón	LIC	Ciudad Real	4.730,1
Sierra Morena	LIC y ZEPA	Ciudad Real	216,7
Tablas de Daimiel	LIC y ZEPA	Ciudad Real	2.345,8
Zona Esteparia de El Bonillo	ZEPA	Albacete	14.789,0

Se observa como para intentar preservar su riqueza paisajística y su significativa diversidad ecológica y cultural, a la par que conseguir un correcto aprovechamiento de los recursos naturales ligados a estas zonas, muchas de estas áreas se benefician actualmente de diferentes figuras de protección y conservación de espacios naturales. El elevado interés existente en la protección de los humedales de la Cuenca Alta del Guadiana resulta indicativo de su riqueza natural y su influencia en la conservación y

mantenimiento de especies amenazadas, mostrándose como uno de los sistemas ecológicos de mayor interés en la Europa mediterránea.

No obstante, esta situación no ha impedido que los humedales manchegos hayan sufrido serios impactos y se encuentren a su vez gravemente amenazados en la actualidad.

De todos los humedales de la Cuenca Alta los dos más significativos son las Tablas de Daimiel y las Lagunas de Ruidera. Ambos espacios naturales se han visto muy seriamente afectados en las últimas décadas a causa del desorbitado incremento de las explotaciones agrarias de regadío con aguas subterráneas en estas dos áreas.

A continuación se realiza una descripción de las características y principales valores naturales de ambos espacios, así como de las problemática a las que han tenido y tienen que enfrentarse tras la sobreexplotación que se ha producido en los acuíferos de la Llanura Manchega y del Campo de Montiel.

Por último se incluye un análisis acerca del estado de conservación, causas de degradación y principales amenazas existentes sobre los restantes humedales que conforman la Mancha Húmeda.

#### **A.2.4.1. Parque Nacional de las Tablas de Daimiel**

Situado en la provincia de Ciudad Real en los términos municipales de Daimiel y Villarrubia de los Ojos, es el más pequeño de todos nuestros Parques Nacionales con una extensión de 1.928 hectáreas, y aparentemente uno de los menos espectaculares. Las suaves ondulaciones del terreno que lo rodea, cubiertas de vides y cereales, características del paisaje del campo manchego, ocultan estos cientos de hectáreas encharcadas que constituyen prácticamente el último relicto de un ecosistema ampliamente extendido en la llanura manchega hace unos años y prácticamente desaparecido en la actualidad: las tablas fluviales o desbordamientos de los ríos provocados por la práctica inexistencia de pendiente en el terreno en zonas de orografía muy poco pronunciada y por fenómenos de endorreísmo.

Las Tablas de Daimiel constituyen un ecosistema privilegiado. Están formadas por el agua de dos ríos de muy diversa naturaleza. Por una parte el Cigüela, procedente de la serranía conquense, aporta sus aguas salobres, por otro lado, el río Guadiana, que nace en sus Ojos a unos quince kilómetros al Este del Parque Nacional, proporciona aguas mucho más dulces. Ambos ríos crean Las Tablas en su confluencia dando lugar a un mosaico de hábitats con características propias originadas por la distinta composición química de las aguas. Entre las zonas inundadas surgen numerosas islas, siendo la isla del Pan la mayor de todas, con una superficie de unas 30 ha.

La excepcionalidad de Las Tablas de Daimiel frente a otras tablas fluviales manchegas está determinada por la interacción entre aportes subterráneos y superficiales y por la diferente estacionalidad y características físicas de sus aguas. Esto proporciona una gran





veía impedida su migración y surgía contribuyendo a la existencia de esta zona pantanosa.

El río Gigüela penetra en el Parque por su límite NE y recoge, antes de desembocar en Las Tablas, las aguas procedentes de las sierras cercanas que se encauzaban constituyendo la llamada Madre Chica del Gigüela, hoy cegada antes de su entrada en el Parque Nacional. Las antiguas Tablas se extendían hacia el este en lo que se conocía como Tablas de Villarrubia actualmente desecadas y cultivadas. El Gigüela es un río de carácter estacional que sufre un periodo de estiaje más o menos prolongado, lo que implica un aumento gradual de la salinidad en sus aguas hasta su total desecación. Durante los años 1974-1975 en que se efectuaron las primeras medidas de la conductividad del río los valores de ésta oscilaban en torno a los 2.500 microsiemens por centímetro (Cirujano, 1992). Estos valores tan elevados se deben a la gran cantidad de sales sulfato - cálcicas disueltas en el agua, tras haber previamente circulado por terrenos de origen yesífero.

Tras su entrada en el parque el Gigüela sufre diversas canalizaciones precisamente en un punto que hoy se conoce como Pata Gallina y del cual surgían diversos canales. En la actualidad el río está canalizado y existe un único cauce principal que termina en la denominada Tabla de Algeciras.

El otro río alimentador y verdadero padre de las Tablas es el Guadiana. En los años 1974-75, el Guadiana era un río de aguas permanentes que sufrían una oscilación máxima no superior a los 50 cm. Las aguas del Guadiana presentaban una conductividad comprendida entre los 700 y los 1.200 microsiemens por centímetro, siendo de características bicarbonatadas cálcicas y presentando un grado de mineralización bajo o medio (Cirujano, 1992). Una vez dentro de los límites actuales del Parque Nacional, el Guadiana divagaba por su parte meridional para dirigirse hacia el Norte por la denominada Madre Vieja del Guadiana y recibir las aguas del Gigüela.

Por último habría que considerar los aportes de las cañadas que vertían sus aguas por el margen septentrional de las Tablas, cañadas del Gato y Lobosa, que tenían cierta importancia durante algunas épocas del año.

En definitiva, en las Tablas de Daimiel confluían por un lado las aguas moderadamente salinas, sulfatado cálcicas y estacionales del Gigüela y por otro las aguas poco mineralizadas, bicarbonatado cálcicas y permanentes del Guadiana. La conductividad de las Tablas variaba entre 2.000 y 5.000 microsiemens por centímetro.

Estos datos están referidos a la década de los setenta, pero algunas referencias existentes sobre el ecosistema de Daimiel y los testimonios orales de los habitantes de la zona parecen indicar que las aguas aportadas en tiempos pasados por el Guadiana eran aún más dulces, pudiendo incluso los pescadores beber de las mismas.



Por otro lado, hay que resaltar que las Tablas desde siempre han experimentado notables oscilaciones en el nivel de sus aguas a lo largo del año, al estar sometidas a la acción de un clima mediterráneo continental, caracterizado por un crudo invierno y un largo estiaje durante la estación cálida. El humedal aparece desde completamente inundado durante los meses invernales hasta alcanzar, a veces, niveles críticos para la fauna y flora que alberga durante los meses estivales.

Resumiendo, en las Tablas de Daimiel podían distinguirse dos zonas o sectores con características ecológicas completamente distintas. Por un lado un sector de aguas dulces permanentemente asociado al cauce del Guadiana con un horizonte turboso importante, originado precisamente por el encharcamiento permanente. Por otro lado habría que considerar un sector con aguas más saladas, semipermanentes, con suelos que podrían llegar a secarse en superficie y que estaba asociado a las aguas aportadas por el Gigüela.

Naturalmente, la vegetación de uno y otro sector era completamente diferente.

En el antiguo cauce y Madre Vieja del Guadiana se encontraba una vegetación característica de aguas dulces, donde se podían distinguir las formaciones acuáticas del cauce y las formaciones marginales de plantas emergentes constituidas por grandes helófitos (Cirujano, 1992).

En el cauce podían encontrarse distintas especies de espigas de agua (*Potamogeton* sp.), miriofílidos (*Myriophyllum verticillatum*) y lentejas de agua (*Lemna trisulca*), predominando en aquellos suelos más ricos en turba el cerdón (*Ceratophyllum submersum*). Hidrófitos como las coberteras, los nenúfares (*Nuphar lutea*), y las ninfaeas (*Nimphaea alba*), habitaban los brazos y pozas de aguas más remansadas.

En las zonas marginales, sobre suelos encharcados durante buena parte del año la masiega (*Cladium mariscus*) se convertía en la especie dominante, hasta el punto de poderse considerar las Tablas como el mayor masegar de Europa occidental (Peinado, 1980). Se encontraba acompañada normalmente de otras especies como el carrizo (*Phragmites australis*), varios tipos de juncos (*Scirpus lacustris*, *Scirpus maritimus*, *Carex hispida*...), lirios (*Iris pseudacorus*) y enneas (*Typha* sp.). La abundancia de estas especies iba decreciendo conforme nos alejábamos de los suelos más húmedos, siendo progresivamente sustituidas por praderas juncuales caracterizadas por la presencia del almorchin (*Schoenus nigricans*). Esta serie de vegetación finalizaba en los juncuales de junco churrero (*Scirpus holoschoenus*), en cuyos claros aparecían especies favorecidas por el pastoreo (*Mentha aquatica*, *Sonchus maritimus*, *Teucrium scordium* ...).

Completamente distinta era la fisonomía de las zonas más septentrionales del espacio protegido. En ellas alternaban amplias áreas desprovistas de vegetación emergente, conocidas como tablas o tablones, con otras en las que la vegetación palustre formaba densas masas impenetrables, áreas que podían secarse en superficie casi por completo.

Las zonas de tablas, en algunos casos con una extensión notable, soportaban una densa vegetación sumergida que se extendía casi hasta la superficie, formada casi en su totalidad por praderas de especies de ovas; *Chara hispida* como especie dominante y *Chara carrescens* tendiendo a poblar las zonas de menor profundidad (Cirujano, 1992). Estas ovas constituían una fuente de alimento seguro, y en muchos casos la fuente de alimento principal para las poblaciones de anátidas del humedal. En medio de las zonas inundadas aparecen numerosas islas, donde encontramos el taray (*Tamarix gallica*) como única especie de porte arbóreo en el Parque (Peinado, 1980).

Esta alternancia entre áreas libres con desecación estacional y dotadas de una alta biomasa vegetal, y zonas cubiertas por vegetación emergente, es lo que confería a las Tablas su singularidad, otorgándole un alto valor como área de refugio y cría; especialmente para las aves.

Las condiciones de equilibrio natural de este ecosistema se han visto severamente modificadas en los últimos años. Ya en la década de los sesenta se acometió un plan, muy acorde con la mentalidad tradicional con respecto a las zonas húmedas, para desecar y ganar para la agricultura unas 25.000 hectáreas de zonas palustres asociadas a los ríos Guadiana, Cigüela, Záncara y Riansares (CHG, 1996). En lo que hoy en día es el Parque Nacional se canalizó el Guadiana, rectificando su curso y profundizando su lecho y se realizaron numerosos canales para desecar el paraje. Este hecho tuvo una gran repercusión en la opinión pública, desencadenando un movimiento de defensa de las Tablas de Daimiel que culminó con la paralización en la zona de las obras de desecación y la declaración del espacio como Parque Nacional.

Sin embargo la principal alteración empezó a producirse ya cuando el espacio gozaba de esta protección. El acuífero de la Llanura Manchega se ha visto seriamente esquilado y al descender drásticamente su nivel no aporta aguas que contribuyan al mantenimiento del humedal manchego. El Gigüela sigue siendo un río de aguas estacionales y de salinidad considerable. El Guadiana se ha visto tan afectado por la sobreexplotación del acuífero que paradójicamente el área de los Ojos del Guadiana ha dejado de actuar como una zona de salida de aguas para hacerlo como un sumidero.

Esta falta de agua, esencial para el mantenimiento del Parque Nacional, trató de evitarse con la puesta en marcha de un Plan de Regeneración Hídrica, aprobado por Ley el 17 de abril de 1987, que contemplaba como medidas más importantes:

- A corto plazo: perforación de sondeos que aseguren en momentos de emergencia el mantenimiento de una lámina de agua. Esta actuación se contempla como transitoria mientras se pongan en marcha las medidas estables.
- A medio plazo: derivación de caudales del acueducto Tajo-Segura, a través del río Gigüela, con destino a las Tablas de Daimiel.

- A largo plazo: construcción de la presa del Canal en el río Bullaque, afluente del Guadiana aguas abajo del espacio protegido. Esta presa permitiría la utilización de los recursos hidráulicos excedentarios de esa cuenca para la regeneración del Parque Nacional.

A pesar de que el Plan de Regeneración Hídrica se aprobó con ánimo de paliar de forma temporal los problemas derivados de la ausencia de agua en las Tablas, la derivación de caudales se ha mantenido hasta la actualidad, habiéndose trasvasado en torno a 236,5 hm<sup>3</sup> a lo largo de 19 años, a pesar de que las pérdidas que se producen en el recorrido resultan muy significativas; estimando el seguimiento de caudales un valor de pérdida del 25% (Villarroya, 2006; Villarroya y Martínez-Santos, 2007). Durante 2009, la eficiencia del trasvase ha sido mínima, estimándose las pérdidas en más de un 96%. Después de dos años sin trasvase debido a la necesidad de asegurar dotaciones de abastecimiento en Levante, el envío de agua se aprobó el 23 de abril y comenzó a producirse en mayo. Las bajas precipitaciones que sufrió la Cuenca Alta durante la primavera motivaron que el agua circulase por cauces totalmente secos, comportándose el terreno como una auténtica esponja, a lo que se unió una elevada evaporación por efecto de las elevadas temperaturas.

El plan de regeneración no es una medida válida para solucionar los problemas del sistema acuífero 04.04, y por otro lado ha supuesto la dependencia del Parque de recursos hidráulicos ajenos al sistema para su manejo y gestión.

En la Figura A.22 se muestra el estado natural de la zona de manantiales de los Ojos sobre fotografía aérea en blanco y negro de 1956, observándose las zonas encharcadas desde los propios Ojos hasta la entrada del Guadiana en las Tablas, en tonos oscuros. La fotografía aérea en la parte inferior de la figura recoge el estado de los Ojos en el año 2006, estando totalmente secos y en parte invadidos por explotaciones agrícolas.

A pesar del esfuerzo realizado para volver a los niveles hídricos anteriores de la zona y aunque éstos en algunas ocasiones se han llegado a recuperar, la dinámica de inundación ha sido alterada, habiéndose producido en los últimos años niveles máximos de extensión de la lámina de agua durante el verano, coincidiendo con la época de máxima afluencia de visitantes, lo cual supone la situación opuesta al régimen natural.

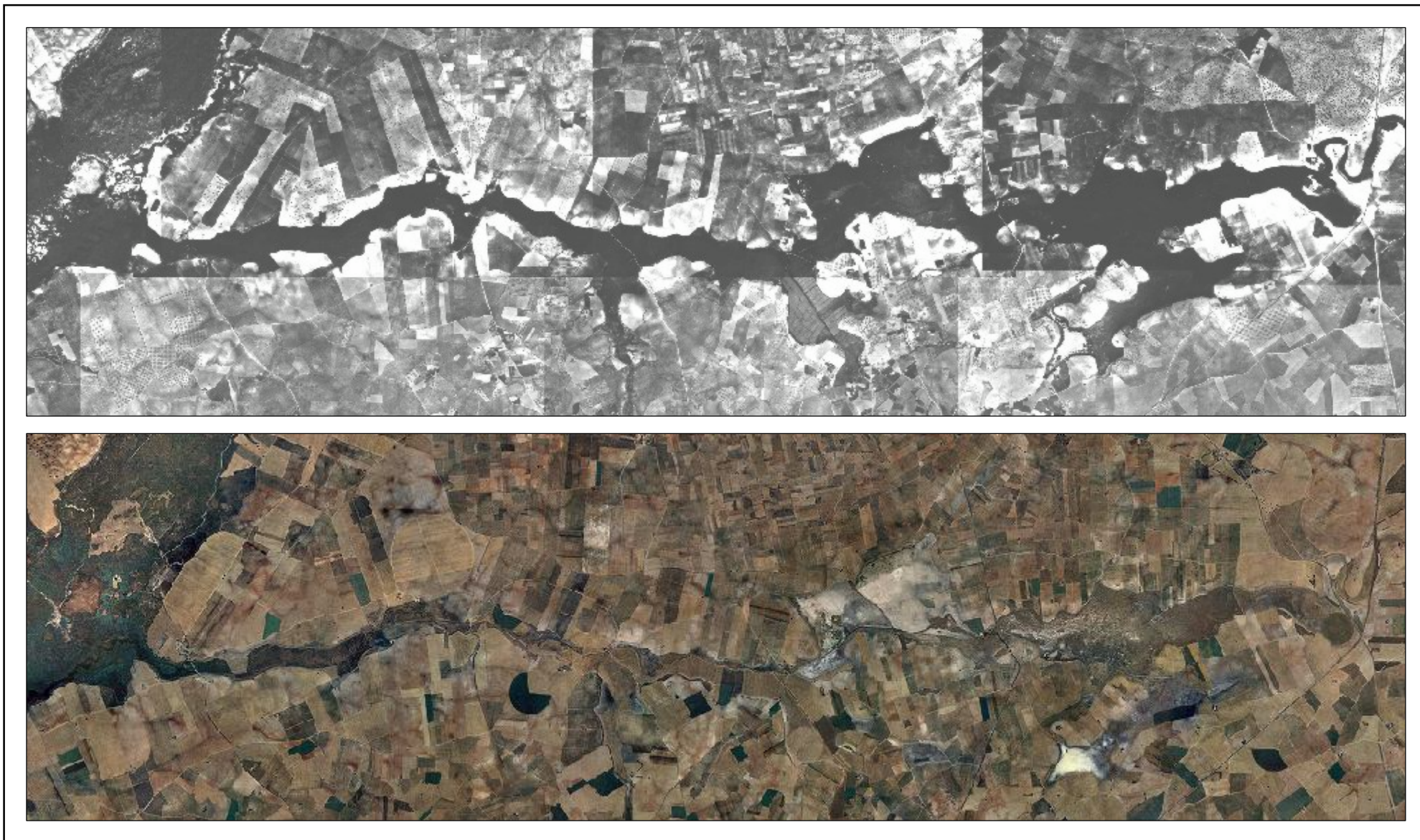


Figura A.22. Fotografías aéreas de los años 1956 (superior) y 2006 (inferior) sobre los Ojos del Guadiana y el cauce del río hasta su desbordamiento en las Tablas

Además, no se ha vigilado lo suficiente la calidad de las aguas que llegaban a Las Tablas que en muchas de las ocasiones no ha sido la deseable, debido a los aportes de aguas contaminadas, a los vertidos existentes, en algunos casos directamente al Gigüela en las cercanías de su entrada en el espacio protegido, o al uso incontrolado de fertilizantes, abonos y pesticidas en los cultivos que se realizan en la zona de protección del Parque (Cirujano, 1996). Las cañadas ya no sólo no suelen traer agua sino que cuando lo hacen pueden ser una nueva fuente de problemas al llegar a veces cargadas de importantes cantidades de contaminantes orgánicos, fundamentalmente alpechines (líquido de color oscuro y mal olor, residuo del proceso de destilación de la aceituna en las almazaras). Esto produce una fuerte contaminación y eutrofización de las aguas, que repercute directamente en la salud de las poblaciones de muchas especies como sucede por ejemplo con las praderas de ovas (Fernández Lop, 1996). Obviamente, de nada sirve traer agua a las Tablas de Daimiel, si su baja calidad constituye un peligro para la propia vegetación que ofrece el soporte de la riqueza naturalística de la zona.

Por otro lado, al modificarse los aportes de agua se ha inducido un cambio en el contenido de sales de las mismas, desapareciendo la tradicional distinción entre un sector de aguas dulces asociado al Guadiana y otro de aguas subsalinas relacionado con las aportaciones del Gigüela. Además las aguas procedentes del trasvase Tajo - Segura recorren la suficiente distancia por zonas de sedimentos salinos como para alcanzar el Parque portando una cantidad apreciable de sales disueltas. Las características físico - químicas de las aguas se encuentran mucho más homogeneizadas, habiéndose producido una salinización de las mismas debido al cese de aportes de aguas dulces. Este incremento de la salinidad está favoreciendo la aparición de plantas con un marcado carácter halófito como *Ruppia maritima*. (Cirujano, 1996)

El Plan de Regeneración Hídrica surgió como respuesta de urgencia a una situación extrema ocasionada por la sobreexplotación del acuífero y agravada por un periodo de grave sequía. A corto plazo, permitió asegurar unos niveles de agua estimables que propiciaron el desarrollo y recolonización de la vegetación sumergida muy afectada en estos últimos años y la prevención de incendios en las zonas de turberas. Estos incendios se producen por la falta de agua, que ocasiona el secado, compactación y oxigenación de las turbas antes inundadas o con un alto contenido de humedad que mantenían un ambiente anaerobio, y que en estas condiciones pueden entrar en estado de autocombustión. El problema de los incendios en las turbas ha vuelto a ponerse de actualidad en el verano de 2009, cuando un año especialmente seco y caluroso ha reducido hasta la mínima expresión la superficie inundada y ha propiciado la aparición de varios focos en el subsuelo de las Tablas que no han podido ser apagados hasta que no se ha vuelto a producir su encharcamiento.

A causa de la alteración de las condiciones naturales la vegetación originaria ha variado sustancialmente; en muchas zonas el paisaje ha sido modificado notoriamente. La



masiega ha sido desplazada por el carrizo que se muestra como un colonizador más agresivo y que se ha visto enormemente favorecido por todas estas circunstancias, impidiendo el desarrollo de otras especies y ocupando zonas anteriormente abiertas e inundadas aprovechando la inexistencia de capas de materia orgánica vegetal. Igualmente la espadaña (*Typha dominguensis*), ha colonizado rápidamente las zonas más afectadas por los incendios (Cirujano, 1996). De esta manera, la masiva propagación de estas dos especies, impide la vuelta a la situación de equilibrio anterior, que propiciaba la existencia de un ecosistema de mucha mayor riqueza, diversidad y singularidad, favorecido por la alternancia entre zonas libres y parcelas ocupadas por la vegetación emergente.

La conservación de estas formaciones vegetales es fundamental ya que su importancia es múltiple: por su intrínseco valor botánico, como elemento que contribuye a caracterizar el paisaje, y por su relevancia para la fauna, actuando como fuente nutricia, soporte en la construcción de nidos, o cobertura frente a depredadores.

La densa vegetación palustre que puebla el Parque se convierte en el hábitat idóneo para un abundante número de especies animales, tanto sedentarias como estacionales, destacando la abundante presencia de aves acuáticas. Todas estas especies muy ligadas al medio acuático también se han visto perjudicadas por la falta de agua en los últimos años aunque quizás no de una forma tan considerable como las especies vegetales.

Las aves son el grupo mas numeroso en la zona, siendo muy considerable la diversidad y abundancia de las aves palustres, para las que el espacio protegido representa un lugar de invernada, nidificación, mancada, reposo en migración y hábitat de especies sedentarias. Este hecho ya se resaltaba en el propio texto legislativo de declaración del espacio como Parque Nacional. El trasiego de aves en las cuatro estaciones del año es muy intenso, teniendo la zona una elevada importancia ecológica debido a su estratégica situación dentro de las rutas migratorias de muchas especies. Una relación de las especies más destacables que han estado presentes en las últimas décadas en las Tablas de Daimiel es la siguiente (Sánchez Soler *et al*, 1992):

- Somormujos: el somormujo lavanco (*Podiceps cristatus*) y el zampullin chico (*Tachybaptus ruficollis*) como especies comunes, y el zampullín cuellinegro (*Podiceps nigricollis*) de presencia irregular.
- Ardeidas: la mayoría de las garzas ibéricas han sido nidificantes en las Tablas: garzas imperial (*Ardea purpurea*) y real (*Ardea cinerea*), las garcillas bueyera (*Bubulcus ibis*) y cangrejera (*Ardeola ralloides*), la garceta común (*Egretta garzetta*), el martinete (*Nycticorax nycticorax*) e incluso el solitario y muy amenazado avetoro (*Botaurus stellaris*).

- Rálidos: gallineta común (*Gallinula chloropus*), polluelas, rascón (*Rallus aquaticus*) y focha común (*Fulica atra*).
- Anátidas: la mayor parte de las anátidas ibéricas se podían observar en el Parque en alguna época del año, siendo la familia más ampliamente representada. El ánade real (*Anas platyrhynchos*) está presente durante todo el año. Entre las invemantes destacaban la cerceta común (*Anas crecca*), el ánade rabudo (*Anas acuta*), el ánade silbón (*Anas penelope*) el porrón bastardo (*Aythia marila*) y el porrón moñudo (*Aythia fuligula*). Tanto el pato cuchara (*Anas clypeata*) como el ánade friso (*Anas atrepera*) tenían importantes contingentes invernales, criando también una parte de la población. Las poblaciones de porrón común (*Aythia ferina*) y pato colorado (*Netta rufina*) se comportaban como buenos indicadores del estado de las praderas sumergidas de ovas y de los niveles de inundación siendo el número de individuos de ambas especies muy variable, tanto en invierno como nidificando.
- Limícolas: En migración se pueden observar un mayor número de especies: agujas colinegras (*Limosa limosa*), archibebes (*Tringa sp.*), combatientes (*Philomachus pugnax*), agachadizas (*Gallinago gallinago*), chorlitejos (*Charadrius alexandrinus*), canasteras (*Glareola pratincola*) o avefrías (*Vanellus vanellus*). En épocas de cría son frecuentes las colonias de cigüeñuelas (*Himantopus himantopus*).
- Láridos: gaviotas y fumareles de diversas especies.
- Rapaces: la rapaz más característica es el aguilucho lagunero (*Circus aeruginosus*), presente todo el año y que construye su nido entre lo más escondido de la vegetación. El alcotán (*Falco subbuteo*) construye también aquí su nido alimentando a sus pollos gracias a la abundancia de insectos, sobre todo libélulas, que pueblan el aire en la primavera y el verano. El águila pescadora (*Pandion haliaetus*) puede observarse en la zona durante su movimiento migratorio.
- Paseriformes: los pequeños pájaros de carrizal tales como buscarlas (*Locustella sp.*), bigotudos (*Panurus biarmicus*), carriceros común (*Acrocephalus schoenobaenus*) y tordal (*Acrocephalus arundinaceus*), buitrones (*Cisticola juncidis*) y escribanos palustres (*Emberiza schoeniclus*) mantienen en el área importantes poblaciones.

La lista de de todas las aves que, permanentemente o provisionalmente, viven en las Tablas de Daimiel resulta muy larga. Pero, además, en estas pocas hectáreas protegidas todos los grupos faunísticos de vertebrados están bien representados (Blas, 1988).

Las Tablas constituyen un hábitat propicio para un buen número de peces, aunque el lucio (*Esox lucius*) especie introducida y predador infatigable, junto con otras peces como el black - bass (*Micropterus salmoides*) casi han conseguido hacer desaparecer a los



peces autóctonos, cuyas especies más relevantes son las carpas (*Cyprinus carpio*) y las gambusías (*Gambusia holbrooki*). En primavera, aparecen las ranitas de San Antonio (*Hyla arborea*) y las dos especies de culebras de agua (*Natrix natrix* y *Natrix maura*). También destaca la presencia de los galápagos leproso (*Mauremis leprosa*) y europeo y del lagarto ocelado (*Lacerta lepida*).

Dentro de los mamíferos habitan las Tablas la rata de agua (*Arvicola sapidus*), el jabalí (*Sus scrofa*), que tiende a bajar de las sierras vecinas para encontrar refugio y alimento entre los masiegales y carrizales, el conejo, la liebre (*Lepus capensis*), el zorro, la comadreja (*Mustela nivalis*), el tejón (*Meles meles*) y la gineta (*Genetta genetta*). Destacaba la existencia de una considerable colonia de nutrias (*Lutra lutra*), especie muy amenazada a nivel nacional y que requiere de aguas de buena calidad para su subsistencia.

Aparte de su riqueza paisajística y de valores naturales, las Tablas de Daimiel son algo más: "un lugar donde todavía puede percibirse difusa una forma de vida que fue única en La Mancha, una cultura basada en aprovechar la enorme riqueza que las Tablas ofrecían; una tradición que merece recogerse." (Cirujano, 1996).

Por tanto queda claro que en el caso de las Tablas de Daimiel nos encontramos con uno de los espacios naturales más valiosos y singulares de toda la península, al mismo tiempo que uno de los más seriamente afectados y amenazados por la acción humana. Los incendios de las turberas detectados en verano de 2009 ocasionados por la ausencia prolongada de inundación han ocasionado daños probablemente de tipo irreversible en el humedal. La rápida e irreparable pérdida del sustrato orgánico, con un tiempo de formación entre los 200.000 y 300.000 años, condiciona en buena medida la permeabilidad el terreno, donde posiblemente haya aumentado la infiltración del agua que ha vuelto a llegar al espacio.

La sobreexplotación de los recursos hídricos y la posterior desconexión hídrica entre el acuífero de La Mancha y los manantiales de los Ojos han causado un problema que no presenta una solución a corto plazo. Mientras la situación no se revierta, años hidrológicos secos e ineficiencias en la gestión de recursos, como la referente al trasvase de 2009, seguirán causando graves daños al ecosistema. Según declaraciones públicas del Patronato del Parque Nacional de septiembre de 2009, las Tablas se encontraban en el peor estado de conservación de toda su historia.

#### **A.2.4.2. Parque Natural de las Lagunas de Ruidera**

Las lagunas de Ruidera son un sistema fluvio-lacustre constituido por un cordón lagunar antiguamente formado por diecisiete lagunas, aunque en la actualidad solamente por quince. Salvando un desnivel de 120 metros, cubren una longitud aproximada de treinta y cinco kilómetros entre las provincias de Albacete y Ciudad Real (González-Martín, *et al*, 1987), estando todas las lagunas conectadas de forma subterránea o superficial.

Este humedal se forma en la zona de drenaje del acuífero del Campo de Montiel hacia la Llanura Manchega, en la zona de menor altitud del altiplano. El nivel de este acuífero aflora a partir de la laguna Blanca, por lo que tiene un papel fundamental en la existencia del sistema de lagos conectados.

La alimentación hídrica de las lagunas proviene además de estos aportes subterráneos, de las aguas superficiales procedentes del Alto Guadiana o de otros pequeños arroyos de la zona y de manantiales situados en las laderas que limitan las lagunas que drenan lateralmente hacia las mismas.

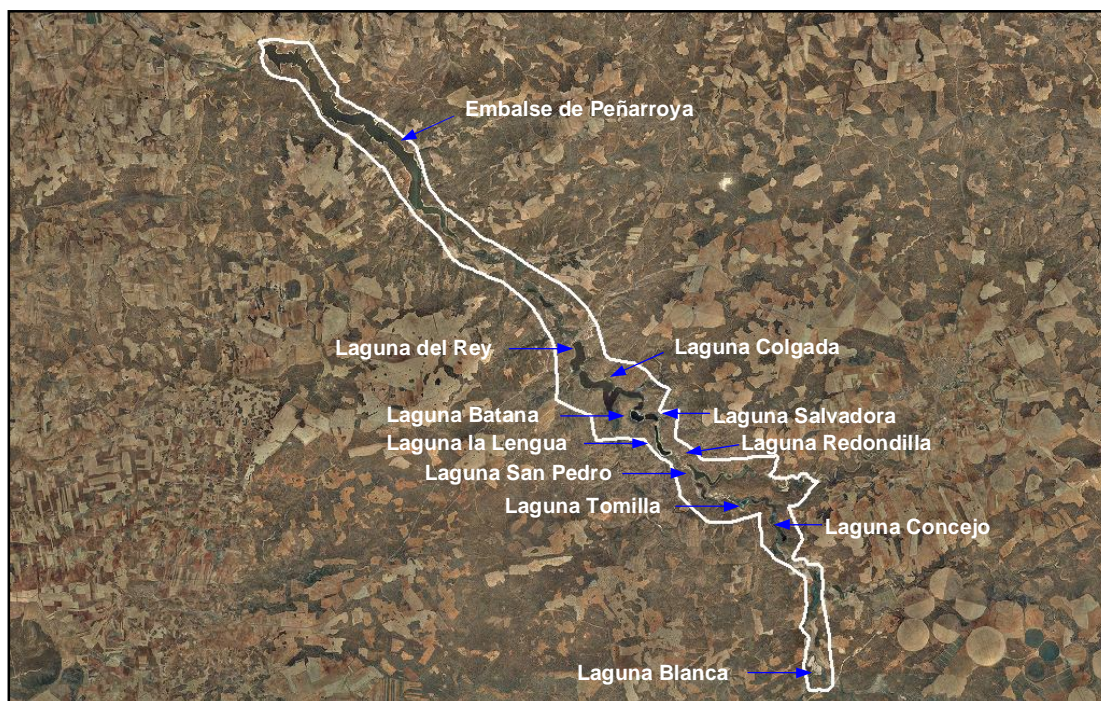


Figura A.23. Delimitación del Parque Natural de Las Lagunas de Ruidera y situación de las lagunas principales. (Elaboración propia)

Todas las lagunas aparecen represadas por barreras naturales tobáceas, formadas por la precipitación de carbonatos, denominadas travertinos, comunicándose hídricamente unas lagunas con otras mediante saltos, cascadas, y pequeños arroyos. Sus bordes ofrecen dos tipologías diferenciadas: bien encontramos orillas suaves sobre las que se asientan cañaverales y vegetación de ribera, bien zonas acantiladas con agrestes paredes y abundantes terrazas. Las profundidades de las lagunas, según estudios batimétricos, se estiman entre los diez y los veinte metros (García del Cura *et al*, 1997).

La importancia de este ecosistema radica en la singularidad de las características que presenta, tanto por sus condiciones naturales y paisajísticas propias como por su original proceso de formación. Las interpretaciones que se han dado a la génesis de las lagunas han sido históricamente muy variadas, si bien actualmente se ha aceptado el modelo propuesto por García del Cura, González y Ordoñez, que explica la existencia de las Lagunas de Ruidera a partir de la formación de las barreras travertínicas. El origen de

estas barreras se debe a su vez, a la precipitación que se produce en aguas ricas en carbonato cálcico a causa de circunstancias que provocan su desgasificación.

El proceso comienza cuando las aguas de lluvia se infiltran a través del propio terreno o por las numerosas fracturas y diaclasas existentes en los roquedos, y se cargan en zonas interiores de bicarbonatos y otros materiales disueltos hasta alcanzar el equilibrio químico, que viene condicionado por la presión parcial del  $\text{CO}_2$ , y por la temperatura. La temperatura de las aguas subterráneas es menor que la de las superficiales, por lo que el fluido es capaz de absorber una mayor cantidad de gas dentro del acuífero.

Estas aguas subterráneas afloran por manantiales laterales o fundamentalmente en el propio lecho de las lagunas y sufren un desprendimiento de  $\text{CO}_2$  debido a la diferencia de temperatura. El contenido de las aguas en este gas también se ve afectado al tener que equilibrarse con el contenido de anhídrido de las lagunas y con la presión parcial de este gas en la atmósfera.

Cuando se rompen las condiciones de equilibrio, y se produce una eliminación del anhídrido disuelto en el agua, se ocasiona una precipitación de carbonato.

Así pues el proceso de formación de las barreras tobáceas comienza cuando el cauce del río presenta alguna irregularidad microtopográfica que origina un pequeño salto de agua. En este punto debido al proceso físico de oxigenación causado por la turbulencia ocasionada, se desprenderá una cierta cantidad de  $\text{CO}_2$ , por lo que precipitarán carbonatos. Además en estos lugares bien oxigenados y con una buena iluminación, al disminuir el espesor de la lámina de agua se dan las condiciones propicias para el desarrollo de comunidades cianobacterianas y de otros organismos vegetales como musgos y juncos. Estos organismos en su proceso de crecimiento y respiración retiran  $\text{CO}_2$  del agua para asimilarlo a sus estructuras vegetativas, produciendo también una precipitación en este caso de carácter bioquímico. Este debió de ser el origen de estas represas que posteriormente fueron creciendo y asentándose y que se encuentran en un proceso permanente de expansión y recesión en virtud de variaciones en el equilibrio químico de las aguas y de procesos físicos y climáticos.

Del conocimiento del mecanismo de formación se pueden sacar varias conclusiones relacionadas con las condiciones necesarias para la conservación de las represas y por tanto de las propias lagunas (García del Cura *et al*, 1997):

- Caudales de agua continuos sin la existencia de grandes riadas.
- Buena luminosidad que permita la eficacia de los mecanismos respiratorios de las especies fotosintéticas presentes en el cauce y las tobas. En este sentido resulta clave controlar los procesos de erosión en las laderas y zonas limítrofes que puedan ocasionar un aumento de los sólidos en suspensión.

- Baja o nula contaminación de las aguas dada la elevada vulnerabilidad que presentan muchos de los organismos que intervienen en la precipitación de los carbonatos ante la presencia de contaminantes.

Este conjunto que ya fue incluido en 1933 dentro de la lista de Sitios Naturales de Interés Nacional, pasó el 13 de Julio de 1979 a ser declarado Parque Natural a causa de sus notables valores ecológicos, geológicos e hidrológicos.

Dentro de la caracterización de los principales valores naturales del Parque, habría que comenzar por su vegetación que, favorecida por la presencia de una enorme mancha de agua durante todo el año, se erige en uno de los últimos testigos de lo que debió ser en otro tiempo la vegetación de La Mancha.

Dentro de la vegetación del Parque se distinguen tres unidades bien diferenciadas (Velayos, 1983):

- la vegetación terrestre para bosques, matorrales y pastos de ladera de valle
- vegetación de borde de agua para cañizales, masegares, céspedes y junciales que se encuentran ligados a niveles freáticos cercanos a la superficie y a inundaciones periódicas
- vegetación estrictamente acuática, compuesta por plantas sumergidas o flotantes.

En una catena ideal de vegetación de una de las lagunas podríamos encontrar varias bandas bien estructuradas y definidas (Velayos, 1983):

En el agua se instalan comunidades acuáticas más o menos bien representadas. Las más frecuentes son las formadas por ovas (*Chara sp.*), *Polygonum amphibium*, verónicas (*Verónica anagallis-aquatica*), espigas de agua (*Potamogeton pectinatus*), miriofílicos (*Myriophyllum verticillatum*) y *Zanichella sp.* El mayor o menor grado de desarrollo de estos hidrófitos depende del mayor o menor grado de inclinación de la orilla, y de la profundidad del agua.

Dentro de la vegetación de borde encontramos una primera banda, donde se instalan comunidades de junco lagunero (*Scirpus lacustris*) y de enea (*Typha sp.*), enraizadas dentro del agua y que no soportan la desecación. Por detrás de estas formaciones crecen los típicos cepellones de masiega (*Cladium mariscus*) que se entremezclan con los carrizos (*Phragmites australis*), también abundantes en la banda anterior. Esta banda requiere mucha humedad pero no tiene que estar necesariamente inundada. Esta vegetación helófito ha sufrido bastantes agresiones y se encuentra en franca regresión debido fundamentalmente a la acción humana por la construcción de carreteras y playas, y en general por el desmesurado proceso de urbanización que sufre toda la zona.

En las laderas se instalan masas arbóreas y arbustivas favorecidas por la influencia de la masa de agua. En la actualidad estas formaciones constituyen una de las últimas

manchas de lo que debió ser en otros tiempos la vegetación propia de toda la región. El bosque natural de la comarca es el encinar de *Quercus ilex subsp. rotundifolia*, que debido a las continuas talas y a un pastoreo incontrolado se encuentra bastante aclarado. Estas acciones han favorecido la aparición de especies matorrales propias del proceso de degradación del encinar. Son frecuentes zonas pobladas casi exclusivamente por romeros (*Rosmarinus officinalis*) y santolinas (*Santolina chamaecyparissus* y *Santolina rosmarinifolia*) en las áreas más planas con un acceso más sencillo para el ganado. En las laderas menos castigadas por la presión humana se puede distinguir un matorral más rico en especies vegetales integrado por tomillares, salviares y aulagares. En las zonas más venteadas domina el cambrón (*Genista pumila*), que adopta una forma achaparrada para protegerse del aire. En las exposiciones más térmicas dominan los romerales y espartales con romero macho (*Cistus clusii*) y esparto (*Stipa tenacissima*), que se entremezclan con densos matorrales de coscoja (*Quercus coccifera*).

Por contra, en aquellos lugares más recogidos donde el bosque aún se encuentra realmente bien conservado es posible encontrar a las encinas acompañadas por especies más propias de zonas más húmedas, como el madroño (*Arbutus unedo*) o las peonías (*Paeonia broteroï*).

En las zonas más elevadas, por encima de los 1.000 metros de altitud, aparece un bosque mixto de sabinas (*Juniperus thurifera*) y encina, apareciendo manchas de sabinas casi puras en aquellos lugares donde el encinar fue explotado para carboneo.

Por otro lado, también es reseñable la fauna que habita el Parque. Para empezar, parece lógico en un ecosistema claramente dominado por la influencia del agua comenzar a hablar de la ictiofauna. Esta es la propia de la cuenca del Guadiana, una de las más ricas de toda la península. Además resulta de especial importancia desde el punto de vista de la conservación; 8 de las 9 especies nativas son endemismos ibéricos y la restante es un endemismo circunmediterráneo. Por otro lado se encuentran en Ruidera hasta 10 especies de peces introducidas, ocho de las cuales se consideran perfectamente aclimatadas (Almodovar and Elvira, 1994). La fauna de peces autóctonos está compuesta por tres especies de barbos: el barbo comiza (*Barbus comizo*), el barbo cabecicorto (*Barbus microcephalus*) y el barbo mediterráneo (*Barbus guiraonis*); la boga del Guadiana (*Chondrostoma willkommii*), el cacho (*Leuciscus pyrenaicus*), el calandino (*Leuciscus albumoides*), la pardilla (*Rutilus lemmingii*), la colmilleja (*Cobifis paludica*) y el fraile (*Salaria fluvialitis*).

Cinco de estas especies se encuentran catalogadas dentro del Libro Rojo de los Vertebrados de España, considerándose el fraile dentro de la categoría E ("en peligro"). Esta misma especie se contempla igualmente dentro del Catálogo Nacional de Especies Amenazadas, dentro de la categoría de "Interés especial".

Dentro de los peces introducidos, destacan la anguila (*Anguilla anguilla*), la carpa (*Cyprinus carpio*), el gardí (*Scardinius erythrophthalmus*), el gobio (*Gobio gobio*), el pez

rojo (*Carassius auratus*), la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*), la gambusia (*Gambusia holbrooki*), y por último los tres peces depredadores introducidos presentes en las lagunas que suponen una amenaza para las especies citadas: el blackbass (*Micropterus salmoides*), el pez sol (*Lepomis gibbosus*) y el lucio (*Esox lucius*).

La presencia de estas especies introducidas es uno de los principales factores que explican el precario estado de conservación en el que se encuentra la ictiofauna nativa, unido a la fragilidad de los ecosistemas acuáticos y a la falta de medidas específicas de protección. La ausencia de peces ictiófagos en la península de una manera general, ha condicionado el hecho de que las especies autóctonas hayan evolucionado y se hayan adaptado a la ausencia de depredadores. La aparición de éstos debido a las sueltas efectuadas para favorecer la pesca deportiva, ha resultado letal para muchas de las especies presentes en las lagunas, que en las zonas bajas y medias donde existe un número considerable de depredadores, especialmente de lucios, han visto seriamente esquilmas sus poblaciones. De esta manera es el tramo alto de las lagunas el que se encuentra mejor conservado.

Otro de los elementos de especial interés dentro del Parque lo constituye la avifauna. A pesar de lo reducido de tamaño del espacio natural protegido, en su interior y debido al gran número de hábitats diferenciados que aparecen en él, se han llegado a contabilizar hasta 202 especies distintas, lo cual corresponde a aproximadamente más del 40% del total de especies presentes en la Península (De Juana, 1994). Esta cifra da una idea de la elevada diversidad de especies, ligadas a ecosistemas diferentes que soporta el Parque Natural. Encontramos un gran número de especies representativas, desde aquellas ligadas directamente al medio acuático como las anátidas entre las que destaca el porrón moñudo (*Aythya fuligula*) como ave emblemática del Parque, el somormujo lavanco o el cada vez más escaso calamón (*Porphyrio porphyrio*); a otras propias de zonas esteparias como la avutarda (*Otis tarda*), el alcaraván (*Burhinus oedicephalus*) o la ganga (*Pterocles alchata*), pasando por especies propias del bosque mediterráneo, de bosques de ribera, del matorral o de áreas rupícolas.

Los reptiles y anfibios también están bien representados dentro de las especies propias de la zona mediterránea, encontrándose 8 especies de anfibios y 12 de reptiles. Ninguno de los miembros de la herpetofauna aparece considerado en peligro de extinción, aunque sí 4 especies de anfibios: el gallipato (*Pleurodeles waltl*) el tritón jaspeado (*Triturus marmoratus*), la ranita de San Antón (*Hyla arborea*) y la ranita meridional (*Hyla meridionalis*).

Por último, dentro del grupo de los mamíferos destaca la presencia de micromamíferos, como musarañas, lirones, ratones o erizos, habiéndose notado la presencia del topillo de Cabrera, único roedor protegido por la legislación. También se han contabilizado hasta nueve especies de murciélagos. Dentro de las especies de mayor tamaño son abundantes los lagomorfos, (liebre y conejo), el jabalí (*Sus scrofa*) y el zorro (*Vulpes*



*vulpes*). El tejón (*Meles meles*) y algunos pequeños carnívoros como la comadreja (*Mustela nivalis*) o el hurón (*Mustela furo*) representan a la familia de los mustélidos. Por último destacar que en los últimos años no se ha producido ningún avistamiento de nutrias, por lo que esta especie, antiguamente pobladora de las lagunas se ha dado como desaparecida de las mismas, seguramente por problemas de alteración de su hábitat y de presión humana.

Queda claro que nos hallamos ante un espacio que tiene especial interés de cara a su conservación, con unas características específicas y altamente singulares en la península. Sin embargo los impactos sufridos por el espacio han sido muy graves, sobre todo sobre las propias lagunas donde la urbanización y el turismo de masas han dañado de forma directa a varias de ellas. La ocupación del dominio público ha resultado evidente y se ha extendido por gran parte del espacio ligado a las zonas húmedas. La construcción desordenada de viviendas en los márgenes y zonas cercanas a las lagunas no solo produce un impacto directo por alteración del hábitat sino que supone un riesgo añadido por aumento de la contaminación difusa de las aguas.

En paralelo se ha producido la disminución de la calidad del agua por la percolación de nutrientes y plaguicidas derivados de la intensificación de la actividad agrícola sobre los acuíferos, y por el aumento de la concentración de dichos elementos al disminuir las reservas hídricas. Este hecho tiene un fuerte impacto sobre los travertinos debido al aumento de la turbiedad en el agua que limita la función fotosintética de musgos y cianobacterias en las barreras y a la acción directa de los propios contaminantes sobre estos organismos y sobre la concentración de anhídrido en el agua, al consumirse parte del oxígeno disuelto en la oxidación directa de algunos de estos compuestos.

El turismo es considerable aunque localizado temporalmente y de bajo nivel y masivo. Básicamente ha sido promovido a través de la creación de playas artificiales en varios márgenes y de la construcción de diversas instalaciones en el espacio lagunar. El impacto de los visitantes se producía incluso sobre los travertinos, que eran de acceso libre hasta hace poco tiempo y en la actualidad se centra en un aumento de la erosión en las zonas de borde de los vasos lagunares.

Pero quizás el principal problema al que se ha enfrentado este espacio ha sido el de la sobreexplotación del acuífero del Campo de Montiel, que es una especie de corazón que proporciona el agua necesaria para la conservación y funcionamiento de los ecosistemas del Parque. En el periodo comprendido entre 1984 y 1987, coincidente con la entrada en el Mercado Común, se produjo la transformación de grandes fincas desde usos forestales o agrícolas de secano a regadío de cultivos de alta dotación, deforestando amplias zonas de monte pobladas de encinares y sabinas. La mayoría de estas fincas se encontraban en la provincia de Albacete en la zona de cabecera de las Lagunas. Esta acción afectó negativamente a los caudales de manantiales, arroyos y ríos del área y por consiguiente a los aportes naturales superficiales y subterráneos a las Lagunas de Ruidera y a las



fuentes de abastecimiento de agua en la zona, motivando conflictos de orden público en las poblaciones de dicho acuífero (Velasco, 2005).

La coincidencia de este proceso de aumento de las extracciones con una serie de años con precipitaciones acusadamente inferiores a la media entre 1990 y 1995, supuso una situación de progresivo vaciado de las lagunas. Para enmendar este problema el primer paso que se dio fue la ya comentada declaración de sobreexplotación del acuífero del Campo de Montiel, estableciendo un perímetro de protección adicional y un Plan Anual de Extracciones como principales herramientas de control.

Así, entre 1986 y 1995 se ha producido un continuo desembalse de las lagunas, observándose un considerable descenso de los niveles hídricos. En este periodo se observó un descenso entre los 10 y 15 metros en los niveles de los pozos situados en las cabeceras de las lagunas (Grande, 1997).

A partir del año 95, la sequía concluyó y comenzó a producirse la recarga del acuífero y de las lagunas, encontrándose hoy en día éstas en unos niveles realmente aceptables. Como se ha comentado en un apartado previo, las extracciones sobre el acuífero se encuentran estabilizadas en los últimos años, no constituyendo en la actualidad una seria amenaza sobre las Lagunas. Sin embargo, de todo este proceso se debe extraer una conclusión clara: "cambios de orden climático, geomorfológico y especialmente antrópico pueden modificar profundamente e incluso hacer desaparecer el sistema fluviolacustre de Ruidera." (González Martín *et al*, 1987).

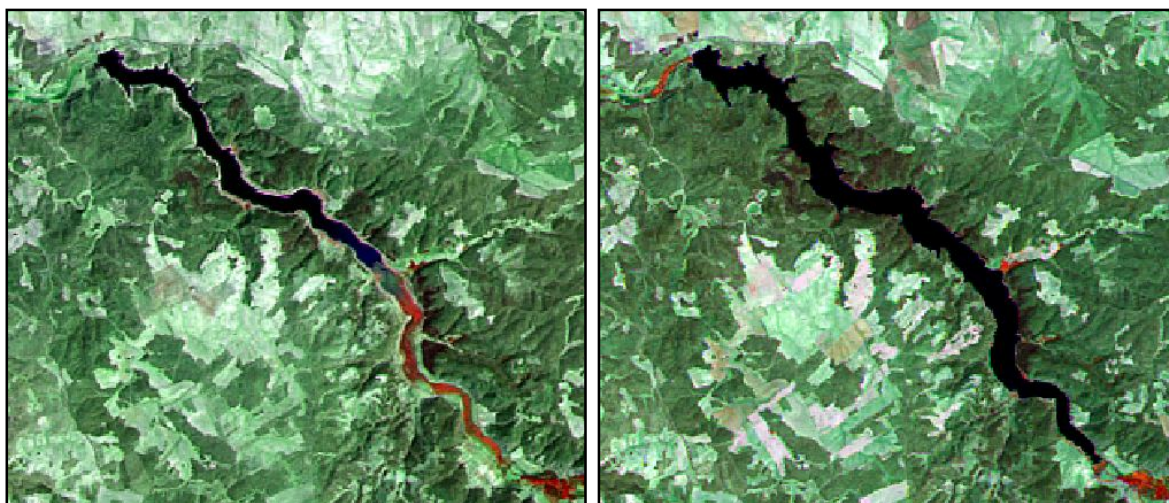


Figura A.24. Comparación de agua embalsada (en negro) en el pantano de Peñarroya entre agosto de 1985 y agosto de 2005. Composiciones infrarrojas del satélite Landsat. (Elaboración propia)

#### **A.2.4.3. Otros humedales de La Mancha Húmeda**

La situación de las Tablas de Daimiel y de las Lagunas de Ruidera es una muestra de la problemática que engloba a una región mucho más extensa y que tiene que ver fundamentalmente con un único asunto: la búsqueda de un nuevo modelo de carácter sostenible de gestión de los recursos hídricos que permita el desarrollo de la región a la par que conserve un carácter propio y diverso que permita un aprovechamiento integral de los mismos.

Esta problemática no ha sido exclusiva de estos dos espacios, sino que ha afectado con la misma o incluso mayor gravedad a los restantes humedales incluidos dentro de la Reserva de la Biosfera de La Mancha Húmeda. Este conjunto está integrado por una multitud de lagunas y desbordamientos fluviales, repartidos por las provincias de Toledo, Ciudad Real, sur de Cuenca y oeste de Albacete, cuyos límites no están definidos oficialmente de forma precisa y que en estado natural ocupaban cerca de 25.000 ha de terrenos encharcados (Cruces y Martínez Cortina, 2000). Hasta la entrada en vigor de la Ley de Aguas de 1985, la Administración no tuvo ninguna obligación normativa para la elaboración de inventarios de zonas húmedas o inundables, por lo que no se conoce con el suficiente detalle la superficie encharcable en régimen natural.

Todo parece indicar que los humedales de la Mancha no habían sufrido cambios antrópicos en la primera mitad del siglo XX (Basanta, 1989). Sin embargo, este mosaico de biotopos se ha visto en los últimos tiempos seriamente afectado por la acción del hombre, unas veces por la desecación artificial de lagunas para disponer de más suelo cultivable; y otras veces, con frecuencia las más graves, por la excesiva extracción de aguas subterráneas, que ha hecho desaparecer una gran cantidad de zonas húmedas debido al descenso de la superficie freática (con aumento de las infiltraciones y pérdida de aportaciones subterráneas). Otros factores que también hay que considerar dentro de esta dinámica son los prolongados periodos de sequía o el encauzamiento de los últimos tramos de los ríos y el aprovechamiento de sus márgenes para el cultivo.

Esta situación ha afectado de forma drástica la dinámica hídrica de los humedales de la Cuenca Alta, por lo que las zonas húmedas con un cierto carácter permanente constituyen en la actualidad una parte menor de la superficie máxima potencial.

La trascendencia de estas afirmaciones se ilustra con la contundencia de las cifras que recogen la evolución de las superficies ocupada por zonas húmedas en la región en el periodo de 25 años comprendido entre 1967 y 1982, coincidente con un periodo en el que se promovieron con gran intensidad actividades de impacto sobre los humedales:

El proyecto de saneamiento y desecación de la Mancha, redactado por la CHG en 1967, evaluaba las superficies encharcables en 25.377 ha, de las cuales se consideraban 23.077 ha asociadas a humedales de tipo fluvial y 2.300 ha correspondientes a zonas húmedas de origen endorreico.

Según datos del ICONA, las zonas húmedas en 1974 se estimaban en 22.034 ha, distribuidas en 19.284 de zonas húmedas fluviales y 2.210 ha en lagunas endorreicas.

A principios de la década de los 80, la situación había empeorado ostensiblemente, reduciéndose las zonas húmedas a las siguientes superficies (SGOP, 1982):

Tabla A.12. Superficie encharcable en la Mancha Húmeda en 1982. (Fuente: SGOP)

Zona de la Mancha Húmeda	Superficie encharcable (ha)
Zona Guadiana – Gígüela	3.135
Zona Gígüela – Záncara	1.950
Zona Záncara – Córcoles	1.026
Zona Alto Guadiana	2.532
Mancha Húmeda	8.643

En la actualidad existe un inventario de humedales elaborado por la CHG a partir de la actualización del Inventario Nacional de Humedales. Consta de 128 unidades que ocupan en su conjunto una superficie total de 9.460 hectáreas. Hay que indicar que una parte significativa (más del 10%) de la superficie encharcable se considera desaparecida, mientras que más del 75% de la superficie restante pertenece a humedales catalogados como alterados o muy alterados

Tabla A.13. Estado de conservación de los humedales inventariados en 2007 (Fuente: CHG)

Estado de conservación	Nº humedales	Superficie (ha)	Porcentaje (%) del nº total de humedales	Porcentaje (%) del total de superficie
Desaparecidos	35	947	27,4	10,0
Muy alterados	29	4.798	22,7	50,5
Alterados	46	2.350	32,8	25,0
Conservados	14	1.082	11,0	11,5
Muy conservados	4	283	3,1	3,0
<b>TOTAL</b>	<b>128</b>	<b>9.460</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

El listado de las zonas húmedas que se extendían a lo largo de la región comprende un elevado número de espacios de gran interés en función de sus valores naturales y de conservación, especialmente para las aves acuáticas. Su escala de interés se ha evaluado en cuatro categorías (entre paréntesis el número de humedales catalogados en cada categoría):

- Incluidas en la Convención Ramsar (9)
- De interés internacional (39)

- De interés comunitario (34)
- De interés Nacional o Regional (46)

Las zonas húmedas dentro de la Mancha incluidas dentro de la Convención Ramsar y que por consiguiente han sido reconocidas como de especial singularidad e importancia son la Laguna de las Yeguas, la Laguna del Camino de Villafranca y la Laguna de la Veguilla, las tres dentro del Complejo lagunar de Alcázar de San Juan; la Laguna del Pueblo, la Laguna de Retamar, las Tablas de Daimiel, la Laguna de Manjavacas, la Laguna de Alcahozo y la Laguna del Prado en el Complejo de Villacañas.

Teniendo en cuenta la clasificación de las zonas húmedas en relación a su interés desde un enfoque internacional, la evaluación del estado de conservación de los humedales de La Mancha en función de su importancia se resume en la siguiente tabla.

Tabla A.14. Estado de conservación de los humedales inventariados en 2007 según su categoría de interés  
(Fuente: CHG, 2008)

Estado de conservación	Escala de importancia			
	RAMSAR	Internacional	Comunitario	Nacional / Regional
Desaparecidos	0	6	1	28
Muy alterados	4	9	4	12
Alterados	5	14	20	7
Conservados	0	9	3	2
Muy conservados	0	1	3	0
Nº humedales	9	39	34	46
Superficie (ha)	1.291	3.969	2.754	450

En resumen, muchos de los humedales de la cuenca se encuentran altamente degradados y, en general, tienden a desaparecer debido al elevado grado de contaminación al que están sometidos y a las agresiones que ejerce sobre ellos el nivel de desarrollo existente, a lo que hay que unir la fragilidad propia de este tipo de ecosistemas. Se trata además de espacios de elevada importancia ecológica y medioambiental, siendo por ejemplo enclaves fundamentales para la supervivencia de muchas especies de aves ligadas al medio acuático (CHG, 2008).

Los problemas directos que sufren en la actualidad estos espacios son, fundamentalmente, la contaminación por vertido incontrolado de residuos sólidos y líquidos, la sobreexplotación turística, el uso como terrenos de cultivo y la urbanización de los mismos (Florín, 2001). Por otra parte, se encuentran también sometidos al peligro de las desecaciones, las alteraciones de cauces y el descenso de nivel de los acuíferos,

hecho que afecta considerablemente a los humedales manchegos debido a la sobreexplotación de los acuíferos sobre los que se asientan.

Los impactos principales sobre las zonas húmedas han sido clasificados en 10 tipos en el estudio de evaluación de impacto ambiental elaborado dentro del Plan Especial del Alto Guadiana (entre paréntesis se indica el número de zonas húmedas afectadas):

- Afección por bajada de niveles de sistema acuíferos (73). La alteración de los balances hídricos afecta muy directamente a todas aquellas lagunas que se encuentran conectadas a los sistemas acuíferos. No solo supone una disminución de los aportes de agua subterránea alterando el ciclo hidrológico de las lagunas, sino que además, muchos sistemas pasan de comportarse como zonas de recarga a ser zonas de descarga hacia el subsuelo, al situarse sobre materiales permeables.
- Drenajes en los cauces fluviales (53). Su efecto es la disminución de las zonas inundadas en las márgenes y llanuras aledañas a los ríos. Principalmente, han venido provocados con el afán de expandir espacios agrícolas aunque también han sido realizados con premisas conservacionistas (CHG, 2007) como los llevados a cabo en los cauces del Riansares y Gigüela para agilizar la llegada de aguas al Parque Nacional de las Tablas de Daimiel.
- Incremento de la inundación de forma artificial (6)
- Agricultura agresiva en el entorno (38)
- Roturación de la cubeta (69)
- Excavación de la cubeta (17), que supone el máximo impacto de presión directa agrícola
- Ganadería o caza (20)
- Alteraciones de la vegetación original (67)
- Vertido de aguas residuales (19), que o bien suponen un impacto grave por la presencia de contaminantes o en el mejor de los casos son aguas depuradas, en cuyo caso las alteraciones se producen en el régimen hidrológico.
- Vertido de residuos sólidos o industriales (20)
- Impacto por usos turísticos, recreativos o urbanísticos (24)
- Impacto por viales interiores (7)

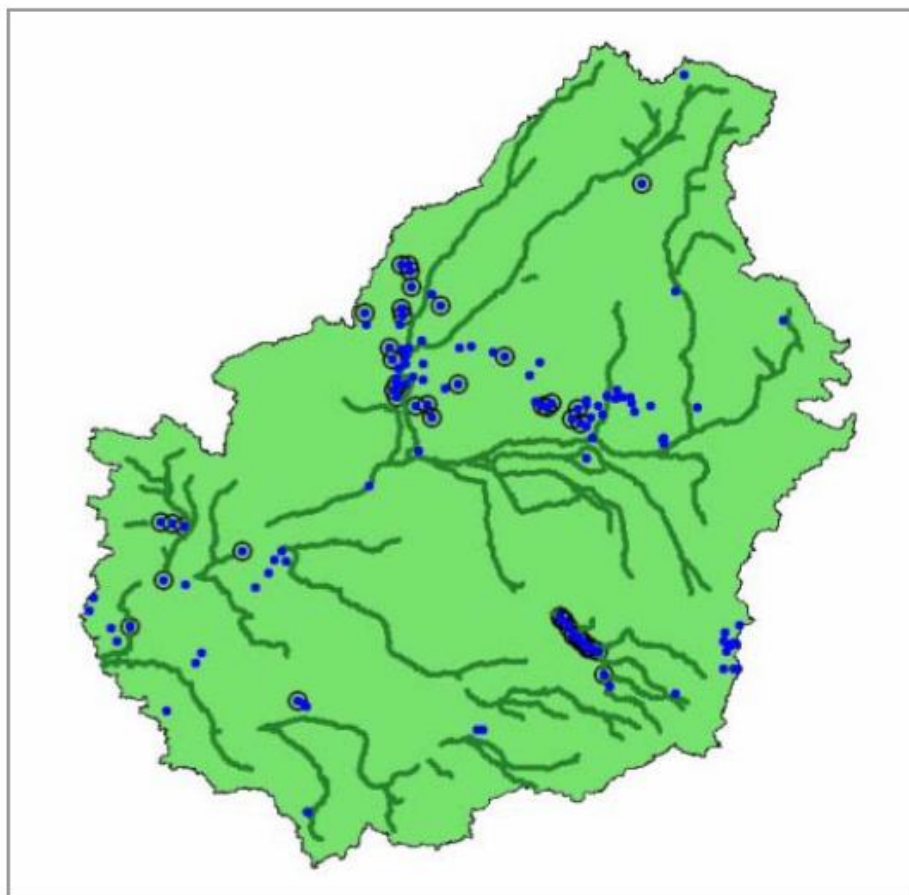


Figura A.25. Zonas húmedas en la Cuenca Alta (en azul) y humedales incluidos en el plan de seguimiento regular (dentro de círculos). (Fuente: CHG, 2008)

Proteger la pervivencia de los recursos naturales es la garantía para el mantenimiento del equilibrio ecológico en la zona y la única manera de asegurar el recurso agua para la pervivencia de las comunidades locales, sin cuya participación se convertiría en vano cualquier esfuerzo.

En los últimos años la sociedad ha tendido a valorar en mayor grado la importancia de las zonas húmedas, habiéndose ampliado las medidas específicas dirigidas a su protección y conservación, aunque la realidad muestra que el camino que queda por recorrer es largo aún. En septiembre de 2007, las principales organizaciones ecologistas españolas, realizaron una petición oficial a la UNESCO para pedir la descatalogación de La Mancha Húmeda como Reserva de la Biosfera. Su objetivo ha sido apelar, como último remedio, a la presión internacional para que las diferentes administraciones busquen soluciones a la problemática existente, que de forma consensuada por todos los actores involucrados, deberían venir de la mano de la aplicación del Plan Especial del Alto Guadiana.

Hay que incidir en la importancia internacional desde un punto de vista limnológico de este conjunto de humedales. En cuanto a su fisiografía, los fenómenos lacustres de La Mancha son singulares a nivel europeo y dentro de la Península Ibérica, La Mancha

Húmeda es la zona con mayor cantidad y diversidad de formaciones palustres únicas. (Fernández Lop, 1996).

Además de su importancia como refugio de fauna, presentan un elevado valor por sus características químicas y los procesos geológicos relacionados con su síntesis, especialmente en el caso de las lagunas salinas. Los valores de productividad primaria registrados en algunas de las lagunas manchegas se encuentran entre los más elevados del mundo (Esparvel, 1994), favorecidas por la aparición de importantes comunidades de microorganismos que llegan a formar auténticos tapetes.

Además, dentro de la vegetación existente encontramos especies con distribución restringida y elevado valor ecológico. Además de estos elementos concretos, La Mancha Húmeda contiene hasta seis tipos de ecotonos considerados como de especial interés dentro de la Directiva de Hábitats de la Unión Europea, lo que por sí solo proporciona una clara muestra de su elevado valor ecológico.





## **A.3. Gestión hidrológica: evolución y perspectiva**



**Portada del capítulo 3 del Apéndice: Riego, mediante un sistema de pívot, de un cultivo de cereal (tradicionalmente de secano)**

### **A.3. GESTIÓN HIDROLÓGICA: EVOLUCIÓN Y PERSPECTIVA**

La relación entre el aprovechamiento de los recursos hídricos y el establecimiento y desarrollo de la población ha variado de forma drástica durante el último siglo, induciendo cambios estructurales sobre el territorio manchego. Las modificaciones introducidas en el modelo productivo y en el tipo de relación existente entre el hombre y el agua han producido un gran impacto tanto sobre las zonas húmedas de la Cuenca Alta como sobre el volumen de recursos almacenados en los acuíferos. Este conjunto de acuíferos regulan y posibilitan el mantenimiento de todo el sistema hídrico.

Las políticas de carácter hidrológico con incidencia sobre el territorio han sido muy numerosas y variadas durante este periodo, hasta el punto de que resulta tremendamente llamativo el cambio acaecido en las motivaciones y efectos previstos de su aplicación.

Este cambio en la visión ha venido impuesto por corrientes de pensamiento globales, que han tenido un gran calado en instituciones y organismos nacionales e internacionales, y ha sido paralelo a la evolución del conflicto que ha enfrentado la conservación de ecosistemas y recursos naturales frente al desarrollo social y económico inherente a las sociedades modernas. Dentro de las regiones áridas o semiáridas, este conflicto se centra en los aspectos cuantitativos asociados al uso de los recursos hídricos, siendo muy numerosos y significativos los casos de afecciones sobre humedales de gran valor debidas al crecimiento desorbitado de la agricultura en regadío en aras de conseguir un mejor nivel de vida para las comunidades humanas de la zona (Mar de Aral, Mar Muerto, humedales costeros de California, Doñana, Lago Chad...).

Desde una perspectiva histórica, las zonas húmedas se han considerado de forma general como tierras improductivas y que favorecían la propagación de enfermedades, hasta que el desarrollo de la ecología y la mayor conciencia ambiental de las sociedades han tendido a cambiar esta percepción. Así, la variación en el enfoque de las políticas hídricas que han sido aplicadas en los últimos cincuenta años sobre la Región Manchega puede considerarse que se ha debido tanto a factores externos como a la constatación de la existencia de un serio problema de gestión de los recursos.

La problemática hídrica generada en la Cuenca Alta del Guadiana no resulta ajena a las sucedidas en otras zonas, aunque sí que presenta un hecho diferencial que aumenta su interés: el comienzo de las extracciones generalizadas de aguas subterráneas que ha caracterizaron el nuevo modelo de crecimiento económico de la región ha coincidido temporalmente con el nacimiento y expansión de movimientos que promueven una mayor conciencia ecológica y pugnan por la conservación y protección de los recursos naturales existentes. En algunas áreas, la expansión del regadío o la transformación directa han alterado gravemente muchas zonas húmedas de gran valor antes de que la conservación de la naturaleza cobrase importancia desde un punto de vista social mientras que en

otras zonas la pobreza y escaso desarrollo socioeconómico de los países donde se asientan se erigen en los principales obstáculos para la conservación de los humedales.

En la Región Manchega, el aumento de las afecciones sobre las zonas húmedas ocasionadas por la expansión del regadío ha sido sincrónico (y sinérgico) con el inicio y crecimiento de la conciencia medioambientalista (Llamas y Martínez Santos, 2005). Así, el conflicto entre desarrollo social y económico y protección de los hábitats y especies, ha estado presente en la legislación puesta en vigor a lo largo de los últimos años, observándose un cambio drástico en las políticas desarrolladas e implantadas en cuyo análisis se centra el presente capítulo.

### **A.3.1. Situación histórica de partida**

La Cuenca Alta del Guadiana es una región interior y con características semiáridas, a pesar de lo cual resulta un área tremendamente rica en recursos hídricos y contiene un conjunto singular de zonas húmedas con variadas características geológicas, ecológicas, faunísticas y limnológicas que dotan a La Mancha Húmeda de importancia y reconocimiento internacional.

La riqueza geológica de la Cuenca Alta y su tremenda horizontalidad propician que La Mancha tenga una “vocación palustre” (Florín, 2001), siendo frecuentes los encharcamientos del terreno. Junto a este hecho, la existencia de un complejo y extenso sistema acuífero sostiene en muchos casos la inundación de muchos humedales, habiendo permitido, además, la existencia de un uso agrícola del agua desde tiempos muy antiguos.

La presencia de humedales salpicados a lo largo del territorio y la existencia de un manto freático en el subsuelo cercano a la superficie en muchos puntos son factores que han contribuido a dotar de una identidad propia al paisaje manchego y que han posibilitado la existencia, a lo largo de los siglos, de una relación singular entre hombre y agua. Los beneficios obtenidos por parte de las poblaciones de la zona a partir de la explotación de los humedales han sido muy variados: abastecimiento, uso del agua para riego de huertas, caza de numerosas especies, mantenimiento de pastos, aprovechamientos energéticos e industriales (recogida de sal),...

Son numerosos los autores que consideran (Esparvel, 1994; Basanta, 1989) que aún en la primera mitad del siglo XX, los humedales de la Cuenca Alta del Guadiana no habían sufrido alteraciones significativas, manteniéndose el modelo de aprovechamiento sustentable de los recursos hídricos totalmente en vigor.

La extensión de las zonas húmedas manchegas merece una cita ya en el “Libro de la Caza”, escrito en 1375 por el Infante Don Juan Manuel y queda respaldada por “Las Relaciones” de Felipe II, estudio encargado por el monarca con objeto de describir los

municipios españoles. En este texto, se dice al respecto del río Guadiana: *“y este río que así nació en los Ojos del Guadiana, donde es grande el golpe de agua, va desde allí muy ancho, lleno de cieno e de enneas y carrizo, que casi no se ve correr, si no es en las paradas de los molinos que ay desde los dichos Ojos donde así nace el dicho río todo lo que dura la jurisdicción que tiene la dicha villa de Daimiel, ocho paradas de molinos que tienen veintiséis piedras harineras que jamás les falta el agua para moler.”* Respecto al espacio de las Tablas, se menciona que asombrado por la abundancia de especies y pensando en su riqueza cinegética, *“mandó su Majestad que se guardase muy bien”*.

Hasta mitad del siglo XX, en que aparecen las primeras referencias a la construcción de pozos y el drenado de ciertas zonas palustres, las referencias principales que aparecen sobre las zonas húmedas en La Mancha se ciñen, por un lado, a su importancia cinegética, siendo las Tablas un importante cazadero y, por otro, a problemas ligados a su presencia, como la existencia de episodios históricos de graves inundaciones en diversos municipios o la expansión de epidemias de fiebres tercianas (malaria o paludismo) a causa de la insalubridad de humedales y cursos de ríos (Serna y Gaviria, 1995).

De esta forma, los humedales que no eran usados como cotos de caza y no permitían aprovechamientos estables para la población de la zona eran considerados áreas de escaso valor y peligrosas para la salud pública: y por tanto siempre que fuera posible se veía como algo positivo el que fuesen roturadas, ocupadas y puestas en cultivo. En este sentido, estas consideraciones afectaban de forma más directa a las tablas de inundación temporal y a algunos humedales de ribera, que además de ser los menos aprovechables en aquellos años, resultan los más sencillos de transformar.

A pesar de la aceptación general de este modo de pensar a lo largo de varios siglos, hasta hace no demasiado tiempo, las acciones sobre los humedales de la Cuenca Alta no fueron demasiado significativas. La estimación de superficie encharcable puede tomarse como un buen indicador de la conservación de los humedales y a su vez de la salud del modelo de relación territorial entre el hombre y el agua. En condiciones poco alteradas, la superficie encharcable dentro de la Cuenca Alta se estimaba entre 25.000 y 30.000 hectáreas (López-Camacho, 1987; CHG, 1993; Cruces y Martínez Cortina, 2000), dependiendo de las condiciones climáticas de cada año.

Este estado adecuado de conservación, no obstante, no se debía al respaldo de la población de La Mancha sino a la falta de medios y políticas de fondo que permitieran la desecación y transformación de zonas húmedas, hechos potenciados por el reducido valor marginal de la agricultura de la zona, que desincentivaba la realización de obras. La transformación de muchos de los humedales era algo percibido como deseable tanto por la población local como por las autoridades encargadas de la planificación regional, únicamente a la espera de que se diesen condiciones más propicias para comenzar la desecación.



En relación a las extracciones de aguas subterráneas, el uso de norias ha sido tradicional en toda La Mancha. Según los datos disponibles (CHG, 2008), solo en el municipio de Daimiel, el número de norias se contabilizaba entre 4.000 y 5.000, mientras que el total inventariado en La Mancha Occidental superaba las 10.000. A pesar de su número, el volumen extraído mediante estos sistemas de riego no era demasiado importante, ya que solamente se tenía acceso a los recursos más superficiales (con profundidades máximas de extracción de entre 6 y 7 metros) y no en todos los periodos del año. El riego tradicional se centraba en pequeñas parcelas para cultivo de hortalizas, patatas y legumbres (Serna y Gaviria, 2005), introduciendo un mosaico de cultivos que alteraba el paisaje de monocultivos de cereales y viña que dominaba el resto de la zona manchega. Dentro del municipio de Daimiel, donde el riego mediante extracciones de aguas subterráneas se encontraba más extendido, la superficie cultivada en regadío mediante norias se estimaba en algo más de 2.000 hectáreas (Pérez Fernández, 1958), lo que atendiendo a los datos anteriores indica un tamaño medio de parcela regada inferior a la media hectárea.

Sin embargo, el inicio de las alteraciones directas de las condiciones de los humedales y de las extracciones mediante sistemas mecánicos de aguas subterráneas se dieron prácticamente a la par dentro de la región Manchega, comenzando con el proceso de degradación generalizado de las zonas húmedas de la Cuenca Alta.

### **A.3.2. Inicio y extensión de la problemática hídrica (1951 – 1985)**

Hasta este momento, la situación hídrica de La Mancha puede considerarse como estabilizada y ajustada a un modelo de gestión tradicional, aunque es a partir de estos años cuando comienzan las obras de desecación de zonas encharcadas, el drenaje de cauces y la instalación de pozos con maquinaria de bombeo para la extracción de aguas del subsuelo. Las medidas tomadas con estos objetivos desde mitad del siglo XX hasta la aprobación de la nueva Ley de Aguas de 1985 han sido muy variadas, y sin duda, han contribuido a la creación de un complicado problema relacionado con la gestión hídrica en la zona.

Las primeras iniciativas para el uso de bombas en la extracción de aguas subterráneas se dieron en el periodo de posguerra, si bien no fue hasta unos años después, en el momento en que la situación política y social se encontró más estabilizada, cuando este tipo de proyectos comenzaron a extenderse. Así, en 1945, se prepara un proyecto para la puesta en riego de una zona junto al casco urbano de Daimiel que sería abastecida mediante una enorme alberca que se llenaría a partir de un pozo de 6 metros de diámetro. Aunque parte de la infraestructura se llegó a construir, el proyecto quedó estancado y fue un fracaso, no llegando a terminarse. En la década de entre 1940 y 1950 se llegan a legalizar 6 pozos en Daimiel según datos disponibles en la Comunidad de



Regantes (Serna y Gaviria, 1995). En esta fecha ya se conocía la existencia de un embalse subterráneo de gran capacidad y era sólo cuestión de tiempo la llegada de proyectos mayores para su puesta en valor.

Fue en 1951, cuando mediante Decreto de 27 de abril, se declaró de Alto Interés Nacional la colonización de La Mancha, definiéndose la zona de actuación como un área de 49.500 hectáreas ubicada dentro de los términos de Alcázar de San Juan, Herencia, Villarta de San Juan, Argamasilla de Alba y Manzanares. Dentro de este Decreto se establecía la urgencia de acometer obras para la captación, elevación y conducción de aguas subterráneas para la puesta en regadío de superficies dentro del área delimitada, considerándose necesaria esta inversión para paliar los problemas sociales existentes en estos municipios y contribuir a su desarrollo. Se estableció a su vez que las aguas alumbradas serían propiedad del Instituto Nacional de Colonización (INC), que podría cederlas a particulares previo abono de un canon.

Solo dos años más tarde, el Decreto de 9 de enero de 1953 avisa de la extracción con éxito de aguas en la zona central del acuífero e intenta establecer mecanismos para agilizar la puesta en regadío de superficies mediante acuerdos con los propietarios de la zona. Esta línea de actuación se alimentó mediante visitas oficiales de altos cargos a la región, que efectuaron declaraciones públicas en prensa y discursos con objeto de estimular la transformación del territorio (Velasco, 2005).

El proyecto de desarrollo de una zona regable atendida con aguas superficiales tomadas del embalse de Peñarroya finalmente vio la luz en 1956 (Decreto de 26 de julio), tras muchos años de demora en la construcción del embalse, después de haber sido proyectado por primera vez en 1920. El Decreto 2.579 de 1962 sirvió para aprobar el Plan General de Colonización de la Zona Regable de Peñarroya, que afectó a una superficie de 10.247 hectáreas situada en los términos municipales de Argamasilla de Alba, Tomelloso y Campo de Criptana.

Este proceso sirvió como punto de salida en la carrera que emprendieron muchos agricultores para la puesta en regadío de terrenos por iniciativa privada, animados desde las propias Administraciones. En Daimiel, la Comunidad de Regantes tiene constancia de la aparición de 411 pozos legalizados en el periodo entre 1950 y 1960.

Entre 1960 y 1974, año para el que la Comisaría de Aguas de la CHG proporciona su primera estimación de 31.000 hectáreas en regadío dentro del acuífero 23 (CHG, 1996c), la superficie transformada sigue creciendo si bien el ritmo resulta aún muy inferior en relación al que llegará posteriormente. Durante este periodo, el Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA) ejecutó la puesta en riego de 8.236 hectáreas que fueron transformadas en la zona central del acuífero, en los términos de Manzanares y Alcázar de San Juan (Zona Regable de La Mancha) y que comprende el actual municipio de los Llanos del Caudillo, por aquel entonces pedanía de Manzanares.

El interés en la transformación de los terrenos agrícolas coincidió con una mayor presión para la desecación de las zonas húmedas de la región. Así, el 17 de julio de 1956, se aprueba una ley sobre “saneamiento y colonización de los terrenos pantanosos que se extiendan inmediatos a las márgenes de los ríos Guadiana, Gigüela, Záncara y afluentes de estos dos últimos, en las provincias de Ciudad Real, Toledo y Cuenca”. Estos trabajos son encargados al INC y al Ministerio de Obras Públicas, estimándose en más de 30.000 hectáreas las superficies a transformar y recuperar.

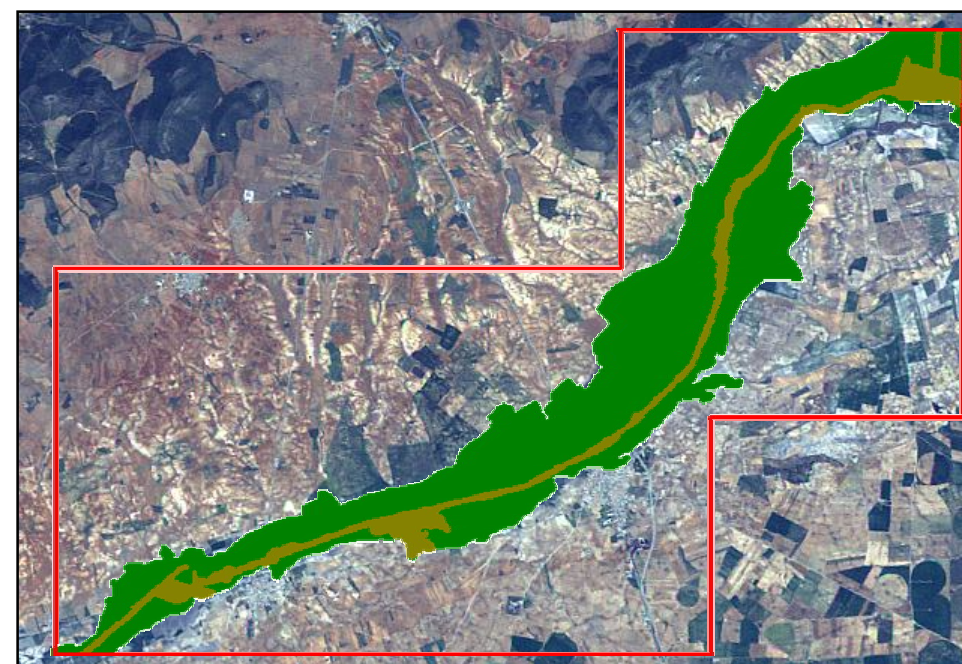
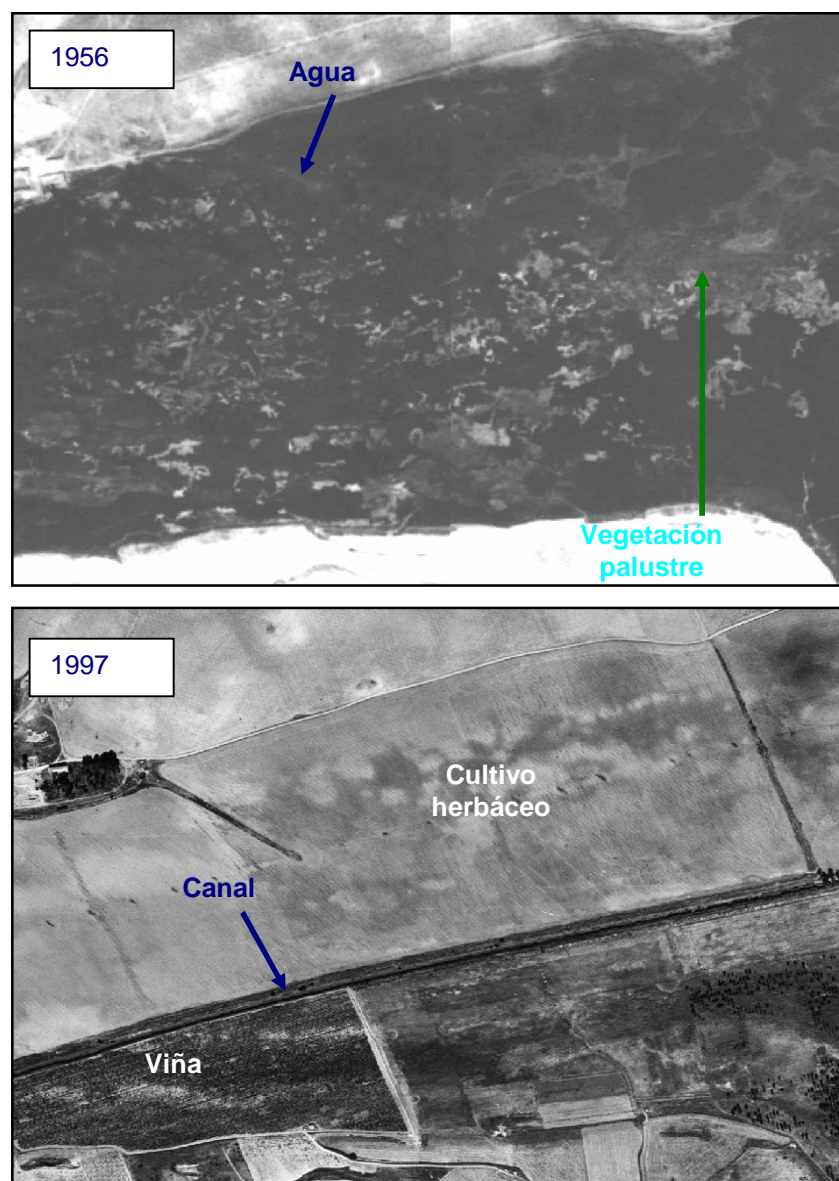
Las obras promovidas por esta Ley se realizaron principalmente al final de los años 60 y principios de la década de los 70 (CHG, 1996c) y los efectos que tuvieron estos proyectos fueron muy amplios. Los ríos Riansares, Záncara y Gigüela fueron muy afectados por las labores de desecación realizadas para la expansión de terrenos agrícolas desapareciendo vegas de gran valor ecológico, como la de Pastrana, y tablas fluviales de excepcional importancia para las aves acuáticas como las de Juntas de los Ríos, las de Cerro Mesado, las de Arenas de San Juan y las de Villarrubia de los Ojos.

En general la desecación de estos espacios se llevó a cabo a partir de drenajes y profundización de cauces con la posterior roturación y ocupación de terrenos. Después de la ejecución de las obras se estima que quedaron en la Mancha unas 10.000 hectáreas de lagunas, ríos y vegas encharcadizas, que podían llegar a ocupar 15.000 hectáreas en años excepcionalmente húmedos (Fernández Lop, 1996).

Dentro de este proceso tuvo especial incidencia la canalización, limpieza y profundización de cauces que se llevó a cabo para favorecer el trasvase de agua desde el acueducto Tajo – Segura hacia las Tablas de Daimiel, aprobado por el Plan de regeneración Hídrica de las Tablas de Daimiel en 1987. En total, se promovieron 155 kilómetros de obras de canalización en el río, por lo que se rompió la comunicación con las zonas inundables conectadas bien, de forma directa, bien, a partir de su acuífero detrítico asociado.

Con objeto de mejorar la eficiencia del trasvase de agua se alteró el equilibrio existente entre el río Gigüela y sus humedales asociados, desapareciendo como consecuencia importantes superficies de zonas húmedas. Así el efecto de una obra diseñada con fines conservacionistas, no puede sino calificarse como un grave impacto sobre el medio hídrico de la Cuenca Alta.

En la Figura A.26 se recoge de forma gráfica el efecto de la canalización del Gigüela sobre una de las zonas húmedas (las Tablas de Cerro Mesado, en Villarta de San Juan) que se formaban como consecuencia de su desbordamiento.



- Áreas ocupadas por vegetación típica de humedal en 1956
- Áreas ocupadas por vegetación típica de humedal en 1997

Figura A.26. Ejemplo de desecación zonas inundadas en las márgenes del Gigüela: Tablas de Cerro Mesado. (Elaboración propia)

En relación a los efectos de la Ley de 1956 sobre el río Guadiana y las Tablas de Daimiel, es en un documento anónimo llamado “Las Tablas de Daimiel y regadíos de Daimiel” donde quizás se explican mejor las consecuencias de las actuaciones llevadas a cabo (recogido en Serna y Gaviria, 1995): *“Esta Ley propició la destrucción de las presas de los antiquísimos molinos instalados a lo largo del Guadiana, de origen árabe o tal vez romano. Posteriormente al derribo de presas se rectificó el cauce del Guadiana, profundizándose entre 3 y 3,5 metros entre el paraje de Malvecinos y los Ojos del Guadiana, amén del rebaje que ya suponía la desaparición de los molinos. Como consecuencia, desaparecieron sus recovecos y meandros, se alteraron rasantes y desapareció casi por completo la parte de las Tablas conocida con el nombre de Las Cañas. También se desecaron las lagunas del entorno: Albuela, Escoplillo, La Nava,... Se da la paradoja, además, de que la obra no fue como tal del Estado, por carecer de estudio y presupuesto previos, ni salir a subasta, bastando certificaciones parciales de obra ejecutada para sufragar los gastos ocasionados. De esta forma se subvencionó la construcción de un canal llamado ‘Nuevo Río Guadiana’, colector, a su vez, de una red de canales axiales para la desecación. Los propietarios circundantes de los terrenos anegados por el agua fueron los impulsores de muchas de las obras, al ver como las fronteras de sus parcelas se vieron incrementadas en no poca superficie. Como consecuencia del rebaje del río Guadiana y la rectificación de su cauce, en el verano de 1971 quedó totalmente desecado el paraje de las Tablas de Daimiel”.*

En el momento de ejecución de todas estas obras las Tablas contaban con la figura de Reserva Nacional de Caza, otorgada en 1966.

La desecación de las Tablas motivó la alerta de naturalistas, investigadores y otros colectivos como el de cazadores, llegando la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) a incluir el humedal dentro de su lista de interés excepcional, con categoría máxima. La situación pasó a ser de dominio público y tratada por los medios por lo que el Gobierno decide ordenar la paralización de las obras de desecación y la creación de una Comisión Interministerial encargada de realizar un seguimiento de la situación. Como resultado de las actividades de esta Comisión se define la Reserva Integral de Aves Acuáticas en el humedal en 1973, y pocos meses más tarde se incluyen las Tablas de Daimiel dentro de la Red Nacional de Parques Nacionales.

Este cambio en la visión de la importancia de los humedales fue coincidente con un periodo de especial desarrollo de movimientos científicos y naturalistas que defendían la importancia de los humedales en base a sólidos argumentos ecológicos, económicos y conservacionistas y que se plasmaron con la celebración de la Convención sobre “Zonas Húmedas de interés internacional, especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas”, más conocida como la Convención de Ramsar; y que fue aprobada en esta ciudad el 2 de febrero de 1971 actuando la UNESCO como organismo depositario. Sus conclusiones se centran en evitar la progresiva ocupación y desaparición de las zonas húmedas,

promoviendo la conservación de sus valores naturales y de sus diversas funciones y actuando no sólo a una escala local y nacional, sino fundamentalmente de una forma global.

Las Tablas de Daimiel y las lagunas manchegas fueron incluidas dentro de la lista de humedales propuestos para su catalogación dentro del convenio de Ramsar, lo que sin duda contribuyó a extender y aumentar la presión internacional para que se tomaran medidas concretas para evitar su pérdida.

La creación del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel supuso un triunfo para el incipiente movimiento conservacionista siendo el espacio elegido como de máximo interés de conservación para representar la diversidad de ecosistemas de lagos y lagunas interiores existentes en la península. Sin embargo, aunque se consiguió que las amenazas directas, representadas por la desecación, fuesen abandonadas, no se logró actuar sobre una amenaza menos visible pero igualmente impactante para el humedal: el crecimiento del regadío en el acuífero de La Mancha Occidental y la consiguiente disminución de los recursos hídricos almacenados.

Durante los años 70 y especialmente durante los años 80, la expansión del regadío por iniciativa privada de miles de agricultores, que se encontró apoyada y auspiciada por diversas medidas implementadas desde la Administración, supuso la sobreexplotación del acuífero, llegando a doblar durante varios años las extracciones a la cantidad media estimada de recursos renovables disponibles (CHG, 2008).

Durante estos años se redactaron varios estudios e informes del Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP), que alertaban acerca de la situación y sus posibles consecuencias sobre las Tablas (Villarroya y Martínez-Santos, 2007). El primer estudio sobre el tema se publicó en 1975 bajo el título “Avance de los resultados obtenidos en el reconocimiento hidrogeológico de la zona de las Tablas de Daimiel”, en donde se evaluaban posibles efectos sobre las Tablas por la explotación intensiva de los acuíferos de la región.

En diciembre de 1977 vio la luz el informe sobre “Los descensos de niveles piezométricos en la zona de Daimiel (Ciudad Real)” (SGOP, 1977), donde por vez primera se reconoció la importancia de las extracciones de aguas subterráneas como factor alterador del equilibrio hídrico existente en torno al acuífero de La Mancha Occidental y donde ya se hablaba de las posibles consecuencias que podrían derivarse del mantenimiento o aumento de las extracciones.

En 1979 se elaboró otro nuevo informe “La influencia en las Tablas de Daimiel de la extracción de aguas subterráneas en la Llanura Manchega” (SGOP, 1979), en el que se detalla la necesidad de una gestión integral del agua en la Cuenca Alta del Guadiana para poder proteger y conservar las Tablas de Daimiel.

Esta conclusión parece enlazar con la designación, un año más tarde, de La Mancha Húmeda como una de las primeras Reservas de la Biosfera dentro de España. Esta figura, recogida dentro del programa MAB (del inglés '*Man and Biosphere*' – 'Hombre y Biosfera') de la UNESCO, integra zonas protegidas representativas de los principales ecosistemas del mundo en los que se aspira a alcanzar y mantener un punto de equilibrio entre actividades humanas y conservación de los recursos naturales. La Reserva de la Biosfera de La Mancha Húmeda alberga una extensión de 25.000 hectáreas potenciales de humedales encharcables de muy diverso origen (endorreicos, kársticos, fluviales) y características limnológicas (lagunas volcánicas, charcas dulces, tablas fluviales y llanuras de inundación, lagunas saladas) e incluye al Parque Nacional de las Tablas de Daimiel así como al Parque Natural de las Lagunas de Ruidera.

Paradójicamente, es también en 1980 cuando se constata por primera vez el secado de los Ojos del Guadiana durante casi la totalidad del año. En este momento las extracciones en La Llanura Manchega se cifran en 320 hm<sup>3</sup>, realizadas desde una superficie regada aproximada de 80.000 hectáreas.

En este mismo año comenzó la construcción de la presa de Puente Navarro situada en la salida del río Guadiana de las Tablas de Daimiel, con objeto de mantener encharcada la mayor cantidad posible de superficie e intentar recuperar áreas desecadas con anterioridad. Estos objetivos fueron conseguidos en parte, aunque la clara anteposición de criterios ingenieriles sobre criterios ecológicos e hidrológicos supuso una considerable alteración sobre el régimen de inundación natural del espacio ligado a las variaciones de la lámina de agua.

Dos años después, España se adhirió a la Convención de Ramsar, ratificando a las Tablas de Daimiel y las Lagunas Manchegas, como una de las zonas del país que se creyó oportuno proteger dentro del marco del mismo, junto a las Marismas de Doñana, La Albufera de Valencia y el Delta del Ebro.

Sin embargo, ante el agravamiento paulatino de la situación hídrica en Las Tablas, el propio patronato del Parque solicitó al ministerio competente el estudio de la explotación de las aguas subterráneas en las inmediaciones de las Tablas de Daimiel. En el trabajo generado "Estudio de la explotación de las aguas subterráneas en las proximidades del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel y su influencia sobre el soporte hídrico del ecosistema" (SGOP, 1983), se cuantificaron extracciones de 70 hm<sup>3</sup> dentro de un área de 800 km<sup>2</sup> que engloba el Parque Nacional. De esta cantidad, en torno a 9 hm<sup>3</sup> fueron bombeados desde dentro de la Zona de Protección del Parque.

Es en este momento cuando se confirma la situación de desconexión entre el sistema acuífero de La Mancha Occidental y Las Tablas de Daimiel. En 1984, año en el que la CHG cifra por primera vez una superficie regada en el acuífero en el entorno de las 100.000 ha y estima una extracción por encima de los 500 hm<sup>3</sup>, es cuando los ojos manan por última vez hasta la actualidad. Desde este momento el Guadiana no ha vuelto



a llevar agua desde su nacimiento en los Ojos, siendo muy probable que este fenómeno no vuelva a ser observado en muchos años.

### **A.3.3. Ley 29/1985 de Aguas**

#### **A.3.3.1. Motivación de la Ley de Aguas de 1985**

El 1 de enero de 1986 entra en vigor la Ley de Aguas 29/1985, que sustituye a la por entonces vigente Ley de Aguas de 1879, y que como mayor novedad introduce la consideración de que *“las aguas continentales superficiales, así como las subterráneas renovables, integradas todas ellas en el ciclo hidrológico, constituyen un recurso unitario subordinado al interés general, que forma parte del dominio público estatal como dominio público hidráulico”* (Ley de Aguas, art.1.2).

Esta nueva concepción de las aguas subterráneas como parte del dominio público supone una modificación sustancial sobre la legislación vigente en aquel entonces, donde las aguas superficiales sí que se consideraban parte del dominio público y eran gestionadas por el Ministerio de Obras Públicas, pero la propiedad de las aguas subterráneas era otorgada a quien las alumbrase y su gestión era controlada por diversos organismos sin funciones claramente establecidas ni integradas.

En el preámbulo de la Ley de Aguas se desarrollan los criterios tenidos en cuenta a la hora de elaborar una nueva normativa sobre el agua y su gestión, partiendo de la declaración inicial de que *“el agua es un recurso natural escaso, indispensable para la vida y para el ejercicio de la mayoría de las actividades económicas”*. Dentro del mismo texto se especifica claramente la motivación existente en el cambio legislativo: *“el agua constituye un recurso unitario, que se renueva a través del ciclo hidrológico [...], consideradas, pues, como recurso, no cabe distinguir entre aguas superficiales y subterráneas. Unas y otras se encuentran íntimamente relacionadas y presentan una identidad de naturaleza y función.”*

Además, se introduce la necesidad de protección de los hábitats naturales ligados al agua, lo que igualmente supone un importante cambio dentro del espíritu de las Leyes de Aguas que han sido promovidas hasta la actualidad: *“Se trata de un recurso que debe estar disponible no solo en la cantidad necesaria, sino también con la calidad precisa. [...] Esta disponibilidad debe lograrse sin degradar el medio ambiente en general, y el recurso en particular, minimizando los costes socio-económicos y con una equitativa asignación de las cargas generadas por el proceso, lo que exige una previa planificación hidrológica.”*

De esta forma, se justifica la creación de un nuevo marco normativo para el agua basándose, en las mejoras producidas en el conocimiento científico que han ayudado a comprender el funcionamiento del ciclo hidrológico, en la conveniencia de tratar el agua



como un recurso unitario en su conjunto y por otro, en la necesidad de adecuar la Ley *“a las profundas transformaciones experimentadas por la sociedad, los adelantos tecnológicos, la presión de la demanda y la creciente conciencia ecológica y de mejora de la calidad de vida.”*

La nueva Ley de Aguas no podría tener un mejor ejemplo práctico acerca de la necesidad de su promulgación que la problemática hídrica que se estaba suscitando en la Cuenca Alta del Guadiana, donde mientras se estaba produciendo su desarrollo normativo, la falta de una legislación apropiada estaba generando al mismo tiempo un serio conflicto en relación a la utilización de los recursos hídricos.

La aprobación de esta Ley llegó más de veinte años tarde a la Cuenca Alta del Guadiana, pues ya muchos años atrás había comenzado la degradación de su sistema hídrico natural (Aragón, 2008), producida por la desecación directa de muchos humedales de carácter palustre asociados a sistemas fluviales, siendo además este proceso coincidente con la proclamación de la existencia de un embalse subterráneo y el fomento de las extracciones desde las propias Administraciones en un momento en que las técnicas extractivas y las perforaciones de sondeo se habían abaratado considerablemente.

Así pues, a fecha de entrada en vigor de la Ley de Aguas de 1985, la superficie de humedales perdida suponía un porcentaje muy elevado del total incluido en la Reserva de la Biosfera de La Mancha Húmeda y los terrenos puestos en regadío por iniciativa privada basados en las extracciones de aguas subterráneas se habían extendido considerablemente por todo el territorio. De hecho, las propias expectativas generadas por la futura aprobación de la Ley, que se sabía que iba a prohibir la apertura de nuevos pozos, pudieron sin duda acrecentar el ritmo de perforación dentro de La Mancha.

### **A.3.3.2. El Registro y el Catálogo de Aguas Privadas**

La Ley 29/1985 deroga a la Ley de Aguas de 1879, que incluía el derecho a la propiedad de las aguas subterráneas alumbradas, y pasa a considerar todas las aguas subterráneas renovables como parte del dominio público. Sin embargo, este cambio en la titularidad de las aguas subterráneas no tiene un carácter retroactivo en cuanto al uso y por tanto no afecta necesariamente a los derechos adquiridos sobre las aguas subterráneas en virtud de la anterior legislación.

Esta situación se trata de regular mediante las Disposiciones Transitorias (DT) 3ª y 4ª de la Ley de Aguas, que contemplan la creación del Registro Temporal de Aguas Privadas (D.T. 3ª) y del Catálogo de aprovechamientos de aguas privadas de la cuenca (D.T. 4ª).

En la DT 3ª se establece que *“quienes, conforme a la legislación que se deroga, fueran titulares de algún derecho sobre aguas privadas procedentes de pozos o galerías en explotación, podrán acreditar en el plazo de tres años, a partir de la entrada en vigor de la Ley y ante el Organismo de cuenca correspondiente, para su inscripción en el Registro de*

*Aguas como aprovechamiento temporal de aguas privadas, tanto su derecho a la utilización del recurso como la no afección, en su caso, a otros aprovechamientos legales preexistentes. [...] Transcurrido el plazo de tres años sin que los interesados hubiesen acreditado sus derechos, aquellos mantendrán su titularidad en la misma forma que hasta ahora, pero no podrán contar con la protección administrativa que se deriva de la inscripción en el Registro de Aguas. [...] El incremento de los caudales totales utilizados, así como la modificación de las condiciones o régimen de aprovechamiento, requerirán la oportuna concesión que ampare la totalidad de la explotación. [...] En todo caso, a los aprovechamientos de aguas privadas les serán aplicables las normas que regulan la sobreexplotación de acuíferos, los usos del agua en caso de sequía grave o de urgente necesidad, y, en general, las relativas a las limitaciones del uso del dominio público hidráulico.”*

El texto de la DT 4ª resulta análogo al anterior, aunque referido a aprovechamientos de aguas calificadas como privadas por la legislación anterior, que deberán ser declarados igualmente ante el Organismo de cuenca, quien, previo conocimiento de sus características y aforo los inscribirá en el Catálogo de aguas privadas.

Así pues, se hizo necesaria la actualización y control de las concesiones de aprovechamientos de aguas subterráneas, adaptando el reconocimiento de estos derechos a la realidad económica y social de la cuenca del río Guadiana.

La superficie estimada de regadío en el acuífero ascendía en 1985 a 110.000 ha de las que 30.000 eran de viñedo (CHG, 1993). Se disponía de otros estudios como el del IGTM referido a 1987, año en que aún seguía la dinámica de transformación, que cifraba la superficie de regadío en 120.000 ha.

El inventario de pozos realizado por la Confederación Hidrográfica del Guadiana en datos referidos al período 1988-89, reconocía que a esta última fecha la superficie en regadío se aproximaba a 130.000 hectáreas en el acuífero (CHG, 1996).

A pesar de que el plazo abierto en virtud de la Ley para la presentación de solicitudes de inscripción de aprovechamientos en el Registro terminó el 31 de diciembre de 1988, no fue hasta varios años más tarde cuando se abordó desde la Confederación Hidrográfica el proceso de creación del Registro y del Catálogo. De esta forma, tras recoger y analizar las solicitudes, la Comisaría de Aguas inició a principios del año 1993, el proceso para estudiar la autenticidad y validez de las declaraciones de superficies de regadío anteriores a la aprobación de la Ley de Aguas. En descarga de la Confederación Hidrográfica, hay que tener en cuenta que la adopción de nuevas competencias sobre las aguas subterráneas no vino acompañada de forma inmediata del aumento necesario en el número de funcionarios asignados a la gestión de los recursos hídricos, quedando algunas confederaciones desbordadas (sobre todo aquellas donde la situación resultaba más compleja, como la del Guadiana).

Así, una vez informatizadas las solicitudes referidas al acuífero de La Mancha Occidental, la suma de las superficies de regadío de las solicitudes presentadas se aproximaba a 180.000 ha. Esta cifra superaba en más de un sesenta por ciento a la de los cálculos oficiales de la Administración (CHG, 1996).

La enorme diferencia entre la superficie para la que se solicitó la inscripción en el Registro y las estimaciones de superficie regada existentes son una muestra evidente de uno de los principales problemas presentes en la gestión hídrica del alto Guadiana: el divorcio existente entre la realidad jurídica y la realidad hidráulica de los pozos (Serna y Gaviria, 1995), de los que muchas veces no se sabe si están secos o en funcionamiento. Unicamente los propios agricultores conocen la realidad sobre el estado de muchos de sus pozos, así como acerca de las actuaciones de limpieza, profundización o elaboración de nuevas perforaciones que se hayan podido llevar a cabo.

El proceso de inventario y cartografiado de superficies con derecho a riego y captaciones asociadas resultó complejo y tuvo que ser llevado a cabo con medios técnicos mucho menos avanzados que los disponibles hoy en día. Estos condicionantes han conllevado la creación de un auténtico problema sobre la legalización de los aprovechamientos de aguas subterráneas.

Dentro del proceso de solicitud de inscripción de derechos de uso privativo de las aguas subterráneas, los interesados debían certificar que poseían un pozo en funcionamiento antes de la entrada en vigor de la Ley y que regaban con él una superficie determinada, que se correspondería con la superficie sobre la que se les otorgaría derecho para seguir regando mediante su inscripción en el Registro o Catálogo (superficie inscrita). Los títulos acreditativos de esta propiedad podían ser de dos tipos:

- Certificado de la Dirección General de Minas, dependiente del Ministerio de Industria, ya que éste era el Organismo encargado de la autorización y legalización de captaciones antes de la aprobación de la Ley de Aguas de 1985.
- Otros tipos de certificados emitidos por Organismos con competencias en el ámbito agrario, que fueron en su práctica totalidad emitidos por las Cámaras Agrarias Locales. Este documento resulta de mucho menor rigor y verosimilitud que el anterior ya que se basa en la declaración del servicio de guardería de la cámara agraria, o de personal del ayuntamiento, acerca de la existencia del pozo y de la superficie regada con el mismo y que es ratificada mediante firma por el secretario o presidente de la cámara.

La mayor parte de las acreditaciones para certificar la existencia de regadíos antes de la aprobación de la Ley de Aguas, se basaban en certificados o informes de las Cámaras Agrarias Locales y en documentos diversos, en su mayor parte insuficientes, de las Jefaturas Provinciales de Minas, siendo escasas las escrituras de propiedad que hacían

referencia a los pozos y en ningún caso a sus características. El análisis estadístico de la documentación presentada aporta los siguientes resultados (CHG, 1996):

- Certificado de Minas y Cámara Agraria: 30.176 ha (18.7%)
- Certificado de Minas únicamente: 37.791 ha (23.4%)
- Certificado Cámara Agraria únicamente 79.598 ha (49,4%)
- Sin certificados acreditativos 13.667 ha (8.5%)

Durante el año 1993, se abrió a información pública el listado de solicitudes de inscripción de aprovechamientos de aguas subterráneas anteriores al 1 de enero de 1986 en el Registro Temporal de Aguas Privadas o en el Catálogo de Aguas Privadas, exponiéndose al público el listado de solicitudes efectuadas y abriéndose un periodo para que cualquier persona que pudiera considerarse afectado o lesionado en sus derechos presentase alegaciones.

Posteriormente se procedió al estudio e inscripción, en su caso, de los expedientes incoados, encontrándose dentro del proceso numerosas dificultades y decidiendo acudir a nuevas fuentes para la obtención de la información necesaria para su resolución.

En este procedimiento una de las herramientas que se utilizó fue la información proporcionada por imágenes de satélite de la zona anteriores a la entrada en vigor de la Ley de Aguas, siendo ésta quizás la primera experiencia existente en el uso de la teledetección para el seguimiento de cultivos en la zona. Se realizó un estudio multitemporal con imágenes del satélite Landsat, en dónde en función de la actividad fotosintética y el contenido en humedad de la vegetación se discriminaron las superficies agrícolas en regadío. Las superficies delimitadas en riego fueron asociadas a una base de datos que contenía información sobre distintos expedientes de aprovechamientos de aguas subterráneas. En los 1.024 expedientes investigados se encontró una diferencia entre la superficie solicitada y la superficie recomendada para su inscripción en torno al 44% (CHG, 1996).

Finalizado el periodo de información pública, se incluyeron las alegaciones en los respectivos expedientes, y tras el análisis de los mismos, y posterior confrontación sobre el terreno de los aprovechamientos durante el año 1993, se procedió a redactar el informe sobre la procedencia o improcedencia del reconocimiento de derechos de aguas privadas sobre expedientes, informándose favorablemente el reconocimiento de 13.310 expedientes y desfavorablemente el de 1.254, por diversos motivos (CHG, 1996):

- Datos insuficientes: 575
- Posteriores al 31/12/1985: 7
- Fuera de explotación: 27
- Duplicados con otros: 489

- A petición propia: 11
- No apreciación de riego en imágenes Landsat: 145

Según datos de la CHG de 1996, año en que finalizó el proceso de resolución de inscripciones en el Registro de Aguas, dentro del acuífero de La Mancha Occidental, sobre una superficie solicitada para su inscripción de 161.092 ha se aceptó como superficie inscrita tras los correspondientes recursos de reposición un total de 124.720 ha. Según los datos publicados en el Plan Especial del Alto Guadiana, la superficie inscrita en el Registro es de 100.575 ha, estando 32.829 hectáreas en trámite de inscripción o a la espera de la resolución de algún tipo de recurso.

Además hay que tener en cuenta la superficie inscrita en el Catálogo de Aguas Privadas, para el que se siguieron admitiendo solicitudes de inscripción hasta su cierre definitivo, que no se produjo hasta la aprobación de la Ley del Plan Hidrológico Nacional (Ley 10/2001). Según la CHG, la superficie total inscrita en el Catálogo correspondiente a aprovechamientos ubicados dentro del acuífero de La Mancha Occidental es de 50.754 ha, estando en situación de trámite un total de 26.501 ha (CHG, 2005).

De esta manera la superficie final inscrita bien dentro del Registro de Aguas, bien en el Catálogo de Aguas Privadas se situará dentro de una horquilla limitada entre las 151.300 ha ya inscritas y las 210.630 ha que potencialmente podrían llegar a inscribirse en caso de que se resolviesen favorablemente para los solicitantes todos los procesos administrativos y judiciales actualmente en curso.

La conclusión es evidente: la superficie de los regadíos que han obtenido las concesiones necesarias resulta excesiva para una explotación sostenible de los recursos hídricos. Teniendo en cuenta que la dotación media de inscripción para el riego de cultivos herbáceos se sitúa en los 4.278 m<sup>3</sup>/ha, el volumen extraíble desde las explotaciones inscritas se sitúa por encima de los 650 hm<sup>3</sup>.

Sobre estos resultados es necesario realizar una serie de consideraciones. El proceso de resolución de expedientes de los acuíferos de La Mancha Occidental y del Campo de Montiel se realizó bajo fuertes presiones del sector para su finalización a la mayor brevedad y bajo una ausencia de directrices generales claras y de documentos compulsados de acreditación de los derechos de aguas privadas, existiendo además un elevado número de expedientes con omisiones y errores y habiéndose producido cambios importantes en el catastro (CHG, 1996). A estos hechos hay que sumar el desbordamiento producido en los servicios administrativos ante el elevado número de solicitudes presentadas.

Por todo ello la propia Confederación asumió la probabilidad de la existencia de errores ante la falta del rigor necesario, debido a la imposibilidad de resolver los expedientes de inscripción con la debida garantía y en los plazos reglamentarios (CHG, 1996).

Además, los inventarios de pozos y superficies de riego asociadas se encuentran sujetos a numerosos problemas que limitan su eficiencia y su posible uso en la gestión de los sistemas acuíferos. Los inventarios incluyen numerosos pozos sin uso que en la actualidad no pueden considerarse captaciones de agua subterránea y en algunos casos contienen datos poco fiables. Sin embargo, el mayor problema aparece con la cartografía de superficies regadas. Dentro del proceso de solicitud de inscripción de los aprovechamientos solo se pedía la localización del pozo, por lo que cuando se llevó a cabo el proceso de resolución de las solicitudes y la posterior inscripción en el Registro o Catálogo, los datos necesarios para la elaboración de la cartografía de superficie regable asociada a cada aprovechamiento no se encontraban disponibles.

Esta deficiencia no fue solventada durante el proceso de resolución de solicitudes y ha producido que sea muy frecuente encontrar diferencias muy considerables entre la superficie inscrita y la superficie cartografiada como regable a partir de cada captación, que en muchas ocasiones resulta inferior a la inscrita.

La ausencia de una cartografía que delimite aquellas zonas donde se puede realizar el riego de cultivos a partir de captaciones con derechos supone un enorme lastre a la hora de poder realizar un control efectivo de las extracciones.

El proceso de inscripción de aprovechamientos resulta un buen ejemplo acerca de la complejidad existente en el análisis y control de las extracciones en la zona, donde encontramos captaciones de muy diverso origen y situación. Algunos de estos pozos se utilizan regularmente para mantener explotaciones de regadío, mientras que otros solo se usan para dar riegos puntuales de apoyo o de emergencia, que suelen producirse únicamente en años con condiciones climáticas adversas.

A fecha de aprobación de la Ley de Aguas, se admitía que los pozos manchegos eran de profundidad muy variable, aunque los grupos conservacionistas denuncian que por lo general eran mucho menos profundos que en la actualidad<sup>4</sup>. Dentro del conjunto de captaciones existentes en ese momento, solo una parte seguirían en funcionamiento con sus características originales. Algunos pozos habrían quedado secos al quedar descolgados de los niveles freáticos, algunos otros habrían sido profundizados (muchas veces bajo la apariencia de realización de labores de limpieza) y otros habrían sido trasladados, (proceso permitido si ha quedado cegado el pozo original) aprovechándose, en ocasiones, para profundizarlos más.

Por otro lado, se conoce la existencia tanto de captaciones totalmente secas y abandonadas, que seguramente se encuentran colmatadas pero que siguen sirviendo para recibir subvenciones, como de pozos realizados de forma ilegal desde los que se

---

<sup>4</sup> Declaraciones públicas de José Manuel Hernández, miembro del Patronato del P.N. de las Tablas de Daimiel y representante en Ciudad Real de Ecologistas en Acción, realizadas en octubre de 2009, y publicadas en [www.soitu.es](http://www.soitu.es).

extrae agua para riego. En ambos casos resulta casi imposible de cuantificar el número de pozos que se encuentran en alguna de estas situaciones, por lo que en distinta bibliografía aparecen cifras muy variables (en el orden entre los miles y las decenas de miles). En relación, por ejemplo, al número de pozos ilegales existentes, son muchas las cifras que se vierten pero no se ha encontrado ningún informe o estudio donde se justifique o explique el tipo de análisis realizado para la obtención del dato.

La situación jurídica resulta compleja y muy posiblemente se encuentra alejada de la realidad hidrológica y social. Si se tiene en cuenta que todos los pozos que han sido profundizados deberían considerarse como ilegales, hoy en día resulta imposible conocer desde un punto de vista práctico cuantos pozos siguen extrayendo agua en las condiciones originales bajo las que han recibido una concesión y cuantos pozos extraen agua de forma ilegal.

Lo que sí parece claro es que los regantes de La Mancha seguirán utilizando el agua de todo el conjunto de pozos existentes, indistintamente de su situación legal, a sabiendas de que el control efectivo a nivel de explotación agrícola resulta muy complicado. En este sentido, algunos autores hablan de la existencia de una verdadera “insumisión hídrica” (Villarroya y Martínez-Santos, 2007), caracterizada por la falta de apoyo a las medidas de tipo vertical que tradicionalmente ha llevado a cabo la Confederación Hidrográfica del Guadiana con objeto de limitar las extracciones y clausurar pozos ilegales, y que han llevado a la existencia de numerosos pleitos por resolver y al desbordamiento de algunos de los servicios encargados de la gestión hídrica.

No obstante, la aprobación de la Ley de Aguas supuso el primer paso hacia el control de las extracciones en los acuíferos de La Mancha, que comenzó con el necesario inventariado de los aprovechamientos de riego y la declaración de sobreexplotación de los acuíferos con riesgo de agotamiento de sus recursos.

#### **A.3.3.3. La figura de sobreexplotación de acuíferos**

En la Ley de Aguas se introduce la figura de protección de sobreexplotación para los acuíferos, (art.54.1): *“El Organismo de cuenca, podrá declarar que los recursos hidráulicos subterráneos de una zona, están sobreexplotados o en riesgo de estarlo, debiendo a la vez imponer una ordenación de todas las extracciones para lograr su explotación más racional”*.

Este artículo es desarrollado en los artículos 171, 172 y 173 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, aprobado mediante el RD 849/1986. Aquí se especifica que un acuífero se encuentra en esta situación *“cuando se este poniendo en peligro inmediato la subsistencia de los aprovechamientos existentes en el mismo, como consecuencia de venirse realizando extracciones anuales superiores o muy próximas al volumen medio de recursos renovables o que produzcan un deterioro grave de la calidad del agua, o cuando la cuantía de las extracciones, referida a los recursos renovables del acuífero, genere una*



*evolución de éste que ponga en peligro la subsistencia a largo plazo de sus aprovechamientos.”*

La Junta de Gobierno de la Confederación Hidrográfica del Guadiana, en su reunión del 4 de febrero de 1987, acordó en su punto 5 declarar sobreexplotado con carácter provisional el Acuífero 23. Así pues, sólo un año después de la entrada en vigor de la Ley de Aguas, el acuífero de La Mancha Occidental ya se acogía a la figura de sobreexplotación. La justificación a este hecho se sustenta en la gravedad de la situación alcanzada en el acuífero, donde los caudales circulantes por los principales ríos no permitían satisfacer las demandas de aguas superficiales de los usos autorizados, ni el mantenimiento de caudales mínimos ordinarios y donde se estimaban extracciones continuadas muy superiores al volumen medio estimado para los recursos renovables.

Esta declaración provisional conlleva los siguientes efectos:

- “a) Paralización de todos los expedientes de autorización de investigación o de concesión de aguas subterráneas.*
- b) Suspensión del derecho de apertura de nuevas concesiones. [...]*
- c) Paralización de todos los expedientes en trámite de modificación de características de las concesiones de aguas subterráneas*
- d) Constitución forzosa de la Comunidad de Usuarios del acuífero, si no existiese.”*

Por otro lado, mediante la resolución de la Dirección General de Obras Hidráulicas, de fecha 12 de junio de 1989, se declara definitivamente sobreexplotado el acuífero del Campo de Montiel. En los años anteriores a esta fecha, se pusieron en riego numerosas fincas de gran tamaño con sistemas circulares mediante pívot, con predominio de cultivos de gran demanda hídrica subvencionados desde la Unión Europea. El rápido crecimiento de las extracciones, unido a la gravedad de la situación existente en el acuífero de La Mancha Occidental, justificaron la toma de esta decisión.

En el caso del acuífero de La Mancha Occidental, no fue hasta 1994, después de haberse terminado el proceso de análisis de las solicitudes de inscripción, cuando se produjo la declaración de sobreexplotación definitiva acordada por la Junta de Gobierno de la CHG en su reunión del 15 de diciembre.

En ambos casos, la declaración definitiva implica la aprobación y aplicación inmediata de un Plan de Ordenación de las Extracciones para cada acuífero sobreexplotado. Este Plan tiene como principal objetivo el ayudar a conseguir superar los problemas hídricos existentes y permite la instauración de un régimen de autorización que restringe el uso del agua modificando las características de las concesiones de uso privativo de aguas subterráneas dentro del acuífero.

En virtud de esta situación, el organismo competente ha de aprobar un régimen de explotación anual en el que se especifican el límite global de agua que se puede extraer

en cada acuífero, así como las dotaciones máximas de riego en función de la superficie de las explotaciones.

Los criterios y cifras impuestos en los regímenes de explotación varían anualmente, aunque durante el tiempo en que se han estado aprobando en ambos acuíferos sobreexplotados no han cambiado significativamente.

De esta forma, los máximos anuales permitidos de extracción para uso agrícola en el acuífero de La Mancha Occidental se han venido situando entre los 170 y 230 hm<sup>3</sup>, mientras que para cada explotación individual se calcula un volumen máximo de extracción que depende de su superficie inscrita.

Dependiendo del año, el volumen máximo permitido por explotación puede imponer limitaciones que afecten porcentualmente a todas las explotaciones por igual o puede tener un carácter regresivo, siendo mayores las restricciones que se imponen según aumenta la superficie inscrita de las explotaciones.

Por ejemplo, para el año 2009, el volumen máximo a utilizar por aprovechamiento de regadío, es el resultante de multiplicar la superficie inscrita por 2.000 m<sup>3</sup>/ha para cultivos herbáceos y 1.500 m<sup>3</sup>/ha para cultivos leñosos, presentando un carácter lineal.

Sin embargo, para la mayor parte de los años restantes, el volumen máximo permitido para el riego de cultivos herbáceos según el régimen de explotación se calculó de acuerdo a una serie de intervalos de superficie inscrita, siendo crecientes las limitaciones según aumentaba la superficie total de la explotación.

Sirva como ejemplo el régimen de explotación del año 2000 (ver Tabla A.15), donde se definían cuatro intervalos diferentes en función de la superficie con derechos de riego de cada explotación, estableciéndose restricciones cada vez mayores en cada intervalo por medio de un coeficiente de reducción del volumen extraíble. De esta forma, las explotaciones menores de 5 hectáreas no sufrían limitaciones, mientras que las mayores, tampoco tenían reducciones en sus primeras 5 hectáreas, pero estaban sujetas a restricciones cada vez mayores según fuese creciendo su superficie total inscrita.

Tabla A.15. Volumen máximo permitido por explotación según el régimen de explotación del acuífero de La Mancha Occidental del año 2000

Intervalo de Superficie Inscrita (SI) (ha)	Coeficiente de reducción	Volumen máximo de extracción (m <sup>3</sup> )
0 – 5	1,00	SI * 4.278
5 – 10	0,50	21.390 + ((SI-5) * 4.278 * 0,5)
10 – 30	0,35	32.085 + ((SI-10) * 4.278 * 0,35)
> 30	0,25	51.336 + ((SI-30) * 4.278 * 0,25)

En la zona de protección del Parque Nacional de las Tablas de Daimiel, normalmente, se establecen limitaciones aún mayores, hasta el punto de haberse llegado a prohibir totalmente el riego dentro de esta zona en alguno de los años.

Para poder controlar el volumen extraído se realizan lecturas, en su caso, de los caudalímetros instalados en la explotación, que deben encontrarse certificadas por la correspondiente Comunidad de Regantes. Cuando no se disponga de caudalímetros, situación en la que se encuentran la mayor parte de las explotaciones, o su funcionamiento sea incorrecto, la estimación del volumen extraído se efectúa aplicando la tabla de dotaciones estándar definida en el Plan de Ordenación de las Extracciones.

Tabla A.16. Dotaciones estándar para cada tipo de cultivo según el Plan de Ordenación de las Extracciones del acuífero de La Mancha Occidental. Para la aplicación de estas dotaciones hay que considerar una reducción del 15% para riegos mediante goteo o exudación. (Fuente: CHG)

CULTIVOS	DOTACIÓN ESTÁNDAR (m <sup>3</sup> /ha y año)	PERIODO DE RIEGO
AJOS	2.500	1 de marzo – 10 de julio
ALFALFA	9.000	1 de abril – 15 de octubre
ADORMIDERA	3.500	15 de marzo – 15 de junio
BERENJENA	8.000	1 de mayo – 30 de septiembre
CEBOLLA	7.000	1 de abril – 31 de agosto
CEREAL	2.000	1 de marzo – 15 de junio
COLZA	2.000	1 de marzo – 15 de junio
GIRASOL	2.000	1 de junio – 15 de septiembre
GUISANTES	2.000	15 de marzo – 15 de junio
LENTEJAS	1.500	15 de marzo – 30 de junio
MAÍZ	8.000	1 de mayo – 30 de septiembre
MAÍZ FORRAJERO	5.000	1 de mayo – 31 de julio
MELÓN	6.000	15 de abril – 30 de septiembre
PATATA	6.000	15 de abril – 15 de agosto
PIMIENTO	8.000	1 de mayo – 30 de septiembre
REMOLACHA	8.000	1 de mayo – 30 de septiembre
SOJA	4.000	1 de abril – 15 de noviembre
TOMATE	8.000	1 de mayo – 30 de septiembre
VEZA FORRAJERA	1.500	1 de marzo – 15 de junio
VID	2.000	15 de abril – 30 de septiembre
OTROS HORTÍCOLAS	7.000	15 de julio – 30 de noviembre
OTROS INDUSTRIALES	7.000	1 de mayo – 30 de septiembre
FRUTALES	5.500	15 de abril – 15 de septiembre

Con vistas a facilitar la rotación de cultivos y racionalizar la explotación de los recursos asignados a cada agricultor, se permite concentrar los derechos asignados a varios aprovechamientos bajo una misma titularidad en un mismo término municipal, a efectos de definir cada una de las explotaciones.

En el Campo de Montiel, el régimen de explotación fue ordenado por primera vez en el año 1989, siendo cada vez más riguroso ante la degradación observada en las Lagunas de Ruidera. La conjunción del aumento de extracciones con el periodo de sequía aumentó los problemas hídricos, por lo que las restricciones se agudizaron hasta el año 1996, llegando a limitar las extracciones a un total de 3,5 hm<sup>3</sup> y en superficies ubicadas fuera de la zona meridional.

Tras la mejora notable que sufrieron las lagunas tras los años hidrológicos excepcionalmente húmedos de 1996-1997 y 1997-1998, y la reducción apreciable de las extracciones motivada por el abandono de los cultivos de alta dotación y la colaboración cercana de la Comunidad de Usuarios del acuífero 24, los regímenes de explotación aprobados anualmente han sido bastante más laxos, llegando a permitirse extracciones para el riego de hasta 8,5 hm<sup>3</sup> anuales, como en el año 2009.

Con carácter anual se establecen dotaciones máximas tanto para el riego de cultivos herbáceos como para el riego de leñosos, que suelen ser independientes del total de superficie inscrita de cada explotación.

Dentro del perímetro de sobreexplotación se define el llamado perímetro meridional, donde las dotaciones máximas por hectárea son inferiores quedando su disponibilidad sujeta a la condición de que el caudal del manantial de Villanueva de la Fuente sea superior a un cierto umbral.

En el caso de La Mancha Occidental, la presencia de un déficit hídrico cuantificado entre 2.500 y 3.000 hm<sup>3</sup> y que corre el peligro de convertirse en estructural si no se continúan reduciendo las extracciones, justifica el mantenimiento de la figura de sobreexplotación, siendo necesario avanzar en la eficacia de las medidas que permitan su cumplimiento. Sin embargo, el acuífero del Campo de Montiel ha presentado en los últimos quince años extracciones muy reducidas en relación a sus recursos renovables medios. Esta situación ha hecho que desde varios sectores se critique la continuidad de la declaración de sobreexplotación (Llamas y Martínez Santos, 2005; Llamas, 1994), afirmando que se produce más por motivos políticos que hidrológicos. Sin embargo, es seguramente la necesidad de mantener los aportes desde el Campo de Montiel hacia La Mancha Occidental el factor que más pesa a la hora de mantener la situación de sobreexplotación en este acuífero.

### A.3.4. Directiva Marco de Aguas de la Comisión Europea

La conocida como Directiva Marco del Agua (DMA) se corresponde con la Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

La DMA representa una apuesta decidida para la implantación dentro de la gestión hídrica de los países europeos de los valores del desarrollo sostenible (Villarroya, 2008), entendido como aquel que satisface las necesidades del presente sin limitar el potencial para satisfacer las necesidades de las futuras generaciones.<sup>5</sup>

Con carácter previo a la enumeración del articulado de la Ley, se incluye un conjunto de consideraciones que tratan de introducir el escenario en el que se enmarca la Directiva. El desarrollo de las sociedades modernas ha traído consigo una inquietud creciente por la conservación y explotación racional de los recursos naturales, derivada de la preocupación por la pérdida en calidad y cantidad de ecosistemas y biodiversidad que este crecimiento ha ocasionado, y esta Directiva supone un planteamiento novedoso para responder a la situación creada.

El primer considerando (cc) ya entra de lleno en la definición del espíritu de la Norma, al afirmar que “el agua no es un bien comercial, sino un patrimonio que hay que proteger, defender y tratar como tal”. Esta afirmación no puede resultar más enfrentada con la realidad hídrica de la Cuenca Alta del Guadiana, donde el conjunto de recursos hídricos existente no ha sido valorado en base a su propia riqueza, sino que ha sido y está siendo sobreutilizado y degradado para el desarrollo de todo tipo de actividades productivas. Dado que esta situación es compartida en diferente grado por numerosas regiones europeas, las consideraciones previas de la DMA dibujan los criterios a tener en cuenta para poder definir “*los principios básicos de una política de aguas sostenible*”.

De esta forma, diferentes criterios de calidad ecológica y gestión sostenible aparecen a lo largo de la DMA como ideas claves a seguir dentro de las políticas hídricas. Así, dentro de los considerandos, aparecen repetidos varios principios directamente relacionados con una visión conservacionista de la utilización de los recursos hídricos y que, en cierto modo, conforman el corazón de la nueva visión de la gestión hídrica como son: *la protección integrada* (cc 7, 9 y 16), *la acción preventiva* (cc 11, 28 y 40), *el uso prudente y racional* (cc 8, 11 y 44), *la sostenibilidad medioambiental* (cc 13, 23 y 41), *la actuación local sobre los problemas* (cc 11, 13, 18 y 33), *el fomento de la participación pública* (cc 14 y 46) y *la responsabilidad ante los impactos ambientales* (cc 11, 38 y 53).

Además, hay que remarcar el concepto de recomendación de uso de criterios de carácter técnico y científico para la toma de decisiones, que son los que junto con el marco

<sup>5</sup> Definición de desarrollo sostenible de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas

legislativo propuesto dentro de la Directiva, deben formar la columna vertebral de una política hídrica común basada en el uso sostenible del agua.

A pesar de que la DMA representa conceptos y principios que se encuentran ligados a concepciones modernas de tipo ambientalista en relación al uso del agua, se puede afirmar que gran parte de los desarrollos que propone y de las medidas que aporta se encontraban ya recogidos en el ordenamiento jurídico español.

En este sentido, el artículo 3, que desarrolla la coordinación de la administración hídrica a través de demarcaciones hidrográficas, introduce un concepto, como es el de gestión a través de cuenca hidrográfica que si bien no estaba instaurado en muchos países de la Unión, se encuentra vigente desde hace más de un siglo en nuestras leyes. Igualmente, los Planes Hidrológicos de Cuenca (art. 13) son el instrumento básico de gestión en nuestro país.

La gestión pública integrada de aguas superficiales y subterráneas como integrantes de un mismo ciclo hidrológico también estaba claramente definida en la Ley de Aguas, que mediante la figura de sobreexplotación de acuíferos trata de garantizar la conservación de las aguas subterráneas.

No obstante, la DMA impone la necesidad de modificaciones considerables sobre la legislación existente, siendo mucho más concisa y detallada en cuanto a los objetivos medioambientales de consecución de un buen estado cuantitativo y cualitativo de conservación de las masas de agua superficiales y subterráneas (art. 4), al seguimiento del estado de los ecosistemas hídricos (art. 6,8 y 10), y al cumplimiento de Programas de Medidas que permitan un uso eficaz y sostenible del agua (art. 11).

Un año antes de la aprobación de la DMA, se produjo la reforma de la Ley de Aguas mediante la aprobación de la Ley 46/1999, de 13 de diciembre, de modificación de la Ley 29/1985, con objeto de resolver problemas de aplicación práctica de la Ley, adaptarla a los cambios producidos por la configuración autonómica del Estado y mejorar la respuesta ante las presiones producidas por el aumento de la demanda, la mejora de la calidad de vida y la creciente conciencia ecológica. En la exposición de motivos de esta Ley ya se reconoce la necesidad de *“articular mecanismos jurídicos idóneos que garanticen el buen estado ecológico de los bienes que integran el dominio público hidráulico”* y de potenciar el papel de las Comunidades de usuarios, principios cuya inspiración resulta fácilmente reconocible en la DMA. Además se introduce una serie de medidas complementarias destinadas a abordar situaciones de sequía.

Posteriormente, mediante el Real Decreto Legislativo 1/2001, se aprobó el Texto Refundido de la Ley de Aguas (TRLA), surgido de la necesidad de refundir y adaptar la normativa existente en materia de aguas. El texto refundido no modifica la anterior Ley de Aguas, sino que reordena el articulado.

Finalmente, sobre la base del TRLA, la Ley 62/03 de 30 de diciembre sobre medidas fiscales, administrativas y del orden social, modifica el texto refundido de la Ley de Aguas para incorporar al derecho español la Directiva 2000/60/CE (DMA). Con objeto de alcanzar los objetivos contemplados en la DMA, se regula la demarcación hidrográfica como nuevo ámbito territorial de gestión y planificación hidrológica, lo que supone igualmente, la modificación de la Ley 10/01, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional, estableciéndose un único plan hidrológico para cada una de las demarcaciones hidrológicas. En la actualidad, varios de los artículos de la DMA han sido directamente tenidos en cuenta e implementados dentro del Plan Hidrológico para la cuenca del Guadiana de 2009.

En año 2004, se presentó el documento relativo a los trabajos descritos en el artículo 5: características de la demarcación hidrográfica y estudio del impacto ambiental de la actividad humana; en el artículo 6: registro de zonas protegidas; y en el artículo 7: aguas utilizadas para la captación de agua potable. En el año 2006, se terminó la documentación relativa al artículo 5 con la redacción del análisis económico del uso del agua. Posteriormente, en 2007 la Oficina de Planificación de la CHG entregó el texto relativo al artículo 8, de seguimiento del estado de las aguas superficiales, del estado de las aguas subterráneas y de las zonas protegidas dentro de la demarcación.

El plan hidrológico de 2009 (aún sin aprobar) recogerá, además, un análisis del grado de cumplimiento de diferentes objetivos ambientales, entre los que se sitúa la reducción de extracciones de aguas subterráneas en la Cuenca Alta del Guadiana con el objetivo de revertir la tendencia actual para el año 2015 y recuperar un estado apropiado del sistema hídrico en 2027. La consecución de un buen estado hídrico en este territorio ha motivado la puesta en marcha de un plan específico: el Plan Especial del Alto Guadiana.

### **A.3.5. Plan Especial del Alto Guadiana (PEAG)**

La Ley de Aguas 29/1985 establecía la figura de los planes hidrológicos de cuenca como herramienta básica para la gestión hídrica. Tras la elaboración y aprobación de los Planes de cada cuenca, estos fueron consensuados e integrados mediante el Plan Hidrológico Nacional (PHN), aprobado por la Ley 10/2001 de 5 de julio. Dentro del propio PHN se reconoce la necesidad de llegar a un estado de uso sostenible de los recursos hídricos subterráneos de la Cuenca Alta del Guadiana, para lo cual determina en su disposición adicional 4ª la realización de una serie de actuaciones encaminadas a este fin bajo la denominación de Plan Especial del Alto Guadiana (PEAG).

El objetivo de esta previsión legal consistía en “*mantener un uso sostenible de los acuíferos de la Cuenca Alta del Guadiana*”, para lo que se preveía un conjunto de actuaciones consistentes en:



*“a) La reordenación de los derechos de uso de aguas, tendente a la recuperación ambiental de los acuíferos.*

*b) La autorización de modificaciones en el régimen de explotación de los pozos existentes.*

*c) La concesión de aguas subterráneas en situación de sequía.*

*d) Otras medidas tendentes a lograr el equilibrio hídrico y ambiental permanente de la cuenca”*

Esta imposición se ajusta al nuevo enfoque proporcionado por la DMA que solicita el establecimiento de programas de medidas que se ajusten a las condiciones regionales y locales (considerando 13) para la resolución de problemas ambientales hídricos y la consecución de un uso sostenible de los recursos.

De hecho, antes de la redacción de la primera versión del Plan entró en vigor la Ley 62/2003, de 30 de diciembre, por la que se traspone la Ley de Aguas de 1985 al nuevo marco comunitario en política hídrica establecido por la DMA, por lo que el PEAG se encuentra inspirado muy directamente por esta Directiva. El PEAG recoge numerosos principios y medidas que emanan de la DMA (Ruiz-Pulpón, 2009), sobre todo en lo que respecta al cumplimiento de los plazos temporales impuestos, la participación social y la preocupación por lograr un buen estado cuantitativo y cualitativo de las masas de agua.

La presentación del primer borrador del Plan se produjo en febrero de 2004, punto de partida del proceso público de discusión acerca del contenido normativo del documento. En esta fase se han visto envueltas distintas Administraciones a distintos niveles de gestión y cuyas competencias presentan relación con el Plan, así como diferentes organizaciones y asociaciones con interés en la gestión hídrica del territorio. La elevada cantidad de alegaciones presentadas da muestra de la importancia de la participación pública recogida durante el proceso de aprobación del PEAG, habiéndose generado un extenso proceso de discusión entre las propias Administraciones con la participación de usuarios variados. En este sentido, el término usuario no se ciñe a los consumidores del recurso, sino que engloba a personas y colectivos con intereses de conservación, de uso deportivo, educacionales, sociales, estéticos... (Villarroya, 2008).

Durante este proceso de discusión, alargado además por los cambios políticos producidos, se aprobó la Ley 9/2006, de 28 de abril, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas sobre el medio ambiente. Tras una consulta oficial por parte de la CHG, se dictaminó la obligatoriedad legal de someter el PEAG al trámite de evaluación ambiental.

Se elaboró por parte de la CHG un Informe de Sostenibilidad Ambiental (ISA) que quedo sujeto a consulta pública y que fue objeto de numerosas alegaciones, contestadas razonadamente teniendo en cuenta algunas de ellas para la revisión del informe y la elaboración de la Memoria Ambiental definitiva. Finalmente, las Direcciones Generales

con competencias aprobaron mediante resolución conjunta la Memoria Ambiental, donde se realizan una serie de indicaciones que han sido recogidas en la redacción definitiva del PEAG.

El documento final del Plan Especial del Alto Guadiana fue aprobado por el Real Decreto 13/2008, de 11 de enero.

#### **A.3.5.1. Marco general y objeto del Plan**

Desde la presentación de un documento inicial para ser sometido a información pública hasta su aprobación definitiva, ha existido un dilatado proceso de discusión en torno el documento del PEAG. No obstante, después de analizar las numerosas alegaciones presentadas y de dilucidar afirmativamente la procedencia de sometimiento al proceso de evaluación ambiental estratégica (según la Ley 9/2006, sobre la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente), se ha conseguido elaborar un documento de amplio consenso, diseñado tras una abundante participación pública y que se queda enmarcado dentro del ámbito normativo que emana de la DMA.

Esta relación se admite ya dentro de los antecedentes del PEAG donde se resaltan tanto los objetivos que comparte con principios generales de la DMA como la búsqueda de mejoras ambientales en aguas superficiales, aguas subterráneas y zonas protegidas siguiendo programas para el cumplimiento de objetivos ambientales según se regula en la DMA.

El PEAG abarca una temática amplia, que se divide en:

- caracterización del ámbito territorial,
- descripción de la problemática hídrica, socioeconómica y ambiental
- un programa de medidas generales y de acompañamiento dirigidas a conseguir un uso sostenible de los recursos y la recuperación ambiental del sistema y
- definición de los órganos encargados de su gestión, coordinación y vigilancia.

En primer lugar, y con objeto de justificar la necesidad del Plan, se realiza un análisis exhaustivo acerca de las características del ámbito territorial de la Cuenca Alta del Guadiana, que tiene como objetivo la caracterización del marco general que delimita, desde ámbitos diferentes, la realidad hídrica existente en la zona.

Este estudio introduce las características geográficas y climáticas del territorio, realiza un análisis socioeconómico para desgranar la realidad demográfica y económica de la Cuenca Alta y pasa a centrarse en los aspectos más relacionados con la situación hídrica: el análisis de los usos del agua (abastecimiento, industrial, agrícola y ganadero) y el estado de los recursos hidrogeológicos, que es enfocado desde perspectivas cuantitativas y cualitativas.

Como complemento a este análisis se realiza una descripción de la situación administrativa en el momento de entrada en vigor del PEAG y se incluye un diagnóstico ambiental, donde se identifican las principales acciones causantes de impactos ambientales y se detallan sus consecuencias sobre el territorio.

De esta forma, en el PEAG se ratifica la necesidad de actuación por parte de la Administración ante el nivel de gravedad producido en las condiciones hídricas de la zona y la dificultad de implantación y funcionamiento efectivo de las medidas administrativas puestas en marcha hasta la fecha.

Así, el objetivo principal del Plan es *“la recuperación de los acuíferos hasta obtener un buen estado, detener el deterioro de todos los ríos, humedales y ecosistemas ligados a ellos y recuperar su funcionalidad ecológica”*, considerándose la existencia de un volumen medio anual de 30 hm<sup>3</sup> de salida desde el acuífero de La Mancha Occidental hacia las Tablas de Daimiel como el indicador de la consecución de este objetivo.

La búsqueda de este objetivo debe conllevar el mantenimiento de una actividad económica que permita conservar un tejido empresarial generador de empleo y de valor añadido para la zona.

El PEAG incorpora un conjunto de programas que tratan de hacer posible la conjunción de ambos objetivos, que si bien se han mostrado como antagónicos en las últimas décadas, deben ser alcanzados de forma conjunta con vistas a alcanzar un desarrollo sostenible que permita la conservación de los recursos hídricos para el futuro.

#### **A.3.5.2. Herramientas y programas de medidas de actuación**

Para intentar conseguir el cumplimiento de los objetivos perseguidos se proponen una serie de medidas que se encuentran englobadas dentro de un conjunto de programas y subprogramas. Estos programas de medidas se dividen en generales y de acompañamiento. Ambos tipos de programas son de cumplimiento conjunto y no pueden ser entendidos como agrupaciones de medidas a ser ejecutadas independientemente.

Los programas generales tratan de actuar de forma directa sobre la presión producida por las extracciones de aguas subterráneas, limitando y gestionando los derechos existentes y se articulan en base a las medidas específicas previstas por la disposición transitoria 4ª de la Ley del PHN para la recuperación de los acuíferos de La Mancha. Encontramos dos subprogramas diferentes.

El primero se centra en las “Medidas de reordenación de los derechos de uso de agua”, buscando la redistribución de los derechos de uso privativo de aguas subterráneas (estimados según la CHG en unos 700 hm<sup>3</sup>) para conseguir una mejor gestión y una reducción del uso de agua para regadío, para lo cual se articulan los siguientes mecanismos:

- *Transformación de los derechos sobre aguas privadas en concesiones de aguas públicas*, lo que permite que los usuarios interesados puedan solicitar la modificación de su captación actual y conseguir una mejora en su gestión, aunque a costa de que la concesión de uso de aguas públicas pueda no ser renovada tras su caducidad.
- *Celebración de contratos de cesión de derechos de uso de agua*. Por este procedimiento, los titulares de derechos de aprovechamientos de aguas públicas podrán cederlos a otros particulares siempre que se cumplan una serie de condiciones que serán fijadas por el Consorcio encargado de la gestión del PEAG. Estas normas implicarán que la cesión, venta o transferencia se lleve a cabo para su uso en un mismo sector de la unidad hidrogeológica, desde un pozo para el que se pueda demostrar documentalmente que se han efectuado extracciones para riego en al menos uno de los últimos tres años y que no suponga ningún tipo de afección significativa sobre el medio hídrico.
- *Adquisición administrativa de derechos de uso de agua y terrenos*. Esta medida se encuentra operativa en la actualidad y comprende la compra directa y totalmente voluntaria de derechos efectivos de uso del agua por parte de la Administración. Esta compra se realiza mediante ofertas públicas gestionadas por el Consorcio del Alto Guadiana, contemplando el precio de compra de derechos la diferencia existente, actual y futura, entre el beneficio potencial obtenible entre cosechas de secano y regadío, de forma que se evite una merma de rentas. A final del año 2009, el precio que se está pagando se sitúa en el entorno de 10.000 euros por cada derecho de uso de agua sobre una hectárea, no incluyendo esta cantidad el valor del terreno.

Se pretende la compra de derechos efectivos siendo necesario acreditar fehacientemente el uso del pozo para regadío en alguno de los últimos tres años. Se pretende que el 70% del volumen de derechos recuperado mediante compra por parte del Consorcio se dedique a la recuperación de acuíferos mientras que el 30% restante pueda servir para “*explotaciones de tipo social de agricultores profesionales u otros usos que la CCAA defina como prioritario*”, lo que en otras palabras puede expresarse como que hasta un 30% de los derechos rescatados podrá emplearse para legalizar a agricultores sin derechos adquiridos de uso de las aguas subterráneas.

- *Planes de Ordenación de Extracciones*, que se aprobarán por disposición legislativa para los acuíferos sobreexplotados y tendrán en cuenta la capacidad de recarga anual del acuífero y la compra y caducidad de derechos.

El segundo programa acomete las “Medidas sobre modificaciones en el régimen de explotación de los pozos existentes”. Únicamente los titulares de concesiones de aguas

públicas podrán llevar a cabo este tipo de modificaciones, requiriendo los titulares de derecho de uso de aguas privadas su previa transformación al régimen de concesión. Esta será la única manera de conseguir un cambio en la ubicación del pozo, alterar las condiciones del régimen de aprovechamiento, o realizar ampliaciones de diámetro o profundización de pozos. En todos estos casos deberán respetarse los caudales previamente existentes, reservándose además la Administración el derecho a denegar cualquiera de estas medidas si representan alguna afección directa sobre espacios naturales de interés.

En conjunción con los programas generales se pretende desarrollar un grupo de programas de medidas de acompañamiento, compuestos por:

- *Programa hidrológico*: dentro del cual se pretenden cumplimentar una serie de trabajos de control y desarrollo de la gestión hídrica dentro de la Cuenca Alta del Guadiana. Incluye subprogramas de herramientas de gestión, de apoyo de medios para reforzar la gestión del PEAG, de actualización y mejora de los inventarios de aprovechamientos, de instalación y control de caudalímetros como herramienta de control directo de las extracciones, de estimación de consumos por teledetección como medida de control indirecto de las extracciones, de actuaciones para la recuperación del Dominio Público Hidráulico, de control de vertidos, de reutilización de aguas residuales, de establecimiento de los perímetros de protección de las captaciones, de análisis de viabilidad de recarga de acuíferos, de puesta en marcha del Consorcio del Plan Espacial del Alto Guadiana y por último, de mejora del conocimiento hidrológico e hidrogeológico del ámbito territorial.
- *Programa de apoyo a las Comunidades de Usuarios*, centrado en la definición y valoración de los trabajos, actuales y futuros, que por competencias pueden desarrollar las comunidades de regantes.
- *Programa ambiental*, donde se especifican una serie de medidas orientadas a la recuperación de hábitats, poniendo especial énfasis en ríos y humedales, a la reforestación del territorio con especies mediterráneas en todo tipo de terreno y vegetación de ribera en las proximidades de los cauces y a la recuperación de patrimonio histórico ligado al medio hídrico.
- *Programa de información y sensibilización ambiental*, cuyo objetivo principal es el fomento de la creación de una conciencia social acerca de la necesidad e importancia de la recuperación del funcionamiento hídrico en régimen natural en la Cuenca Alta del Guadiana y del valor de los ecosistemas ligados al medio hídrico dentro de este territorio.
- *Programa de abastecimiento y depuración de aguas*, para fomentar una mayor eficiencia y capacidad de reutilización en usos urbanos.

- *Programa de desarrollo socioeconómico*, que va a ser integrado dentro del Plan de Desarrollo Local Sostenible (PDLS), que ha sido elaborado por la JCCM. Este programa intenta definir líneas de desarrollo económico que permitan diversificar la actividad en la región permitiendo un “*crecimiento basado en el uso eficiente del agua*.”
- *Programa de modernización y desarrollo agrario*, que será igualmente englobado por el PDLS y que comprende medidas para la modernización de regadíos y explotaciones, el fomento de “cultivos sociales”, de agricultura ecológica y de industrias agroalimentarias, para el establecimiento de una prima a los cultivos agroenergéticos ligados a instalaciones para la generación de energías renovables y el compromiso de analizar una posible implantación de una política dirigida a la recuperación y fomento de sistemas extensivos de cultivo en secano.
- *Programa de seguimiento*, impuesto por el Informe de Sostenibilidad Ambiental y que tiene asignadas las labores de evaluación del grado de cumplimiento de las actuaciones ambientales y la identificación de los impactos derivados de la falta de ejecución de alguna de las medidas previstas.

El presupuesto total para el desarrollo de todos los programas propuestos supera la cifra de los 5.500 millones de euros, lo cual supone un desembolso muy superior a cualquier otra actuación comparable que se ha llevado a cabo hasta la actualidad.

La implantación y ejecución de estos programas debería conllevar la recuperación del buen estado cuantitativo y cualitativo del sistema hídrico manchego así como establecer las bases que posibiliten una pervivencia y continuidad del modelo de uso del recurso.

#### **A.3.5.3. Objetivos ambientales**

El primer paso de cualquier proceso de recuperación debe obligatoriamente comenzar por la identificación y valoración de los impactos y amenazas que han producido o están produciendo la alteración de las condiciones adecuadas de conservación de hábitats o recursos.

En el caso de la problemática hídrica del alto Guadiana, los impactos producidos sobre el medio han sido producidos por alteración de ecosistemas y paisajes, degradación de suelos, modificaciones graves del sistema hidrológico por la extracción desmesurada de aguas subterráneas para el riego de cultivos, modificación de cauces de ríos, ocupación y modificación de zonas húmedas, presencia de contaminantes en las aguas y ocupación del Dominio Público Hidráulico.

Este conjunto de impactos, como se ha visto, han ocasionado serios problemas de índole ambiental que pueden agruparse en las siguientes cuatro categorías:

- a) Sobreexplotación de acuíferos

- b) Deterioro de la calidad de las aguas y problemas de abastecimiento
- c) Pérdida y degradación de ríos y humedales
- d) Transformación del paisaje

La alteración de los niveles del acuífero de La Mancha Occidental es seguramente el principal problema que se afronta, lo que justifica que sea el impacto directamente abordado por los programas generales del PEAG. El objetivo final de recuperación se alcanzará en el momento que las salidas del conjunto hídrico de la Cuenca Alta presenten un volumen medio anual de 30 hm<sup>3</sup>, para lo cual se pretende que la batería de medidas incluidas en el PEAG permitan reducir las extracciones totales dentro del territorio a un volumen inferior o igual a los 200 hm<sup>3</sup> anuales.

Esta reducción se intenta conseguir mediante el control de las extracciones y la adquisición, de forma voluntaria, de derechos de agua por parte de la Administración, además de una serie de medidas paralelas encaminadas a la transformación de la agricultura de regadío en la región.

La hipótesis de trabajo barajada por el PEAG es que respetando este umbral de extracción *“se revertiría la tendencia de evolución de los niveles piezométricos actuales, iniciándose el camino hacia la obtención de los objetivos ambientales, sin afecciones socio-económicas importantes”*.

Se pretende conseguir la recuperación de los sistemas acuíferos para el año 2027, fin del periodo de segunda excepcionalidad temporal para el cumplimiento de los objetivos establecidos por la DMA y mantener a partir de ese momento un modelo sostenible de explotación de los recursos hídricos subterráneos.

Sin embargo, este objetivo no debe tomarse como el fin en sí mismo, sino que debe ir acompañado del cumplimiento de otras condiciones que en su conjunto permitan afirmar que se ha restablecido el buen estado cuantitativo y cualitativo del conjunto hídrico formado por aguas subterráneas y superficiales en la Cuenca Alta el Guadiana.

En este sentido, la reducida calidad de las aguas subterráneas y superficiales ha obligado a definir objetivos concretos para mejorar la depuración de aguas y controlar la contaminación difusa por nitratos y reducir procesos contaminantes tanto puntuales como difusos. La recuperación cuantitativa del acuífero ayudaría tanto a la mejora de calidad de las aguas subterráneas por el efecto de dilución como a la mejora del estado ecológico de las aguas superficiales.

En relación a la protección de humedales y otros hábitats de interés, el PEAG contiene un subprograma específico al respecto, donde las principales medidas se centran en la conservación de las zonas húmedas más emblemáticas. Además, se pretende regenerar un número y extensión considerable de espacios naturales ligados al agua, recuperando las condiciones limnológicas, ecológicas y paisajísticas características.



De momento, se pretende mantener aportes externos (Trasvase Tajo – Segura para el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel y vertidos depurados de aguas residuales para otros humedales) para evitar el agravamiento de daños en varias zonas húmedas.

Por último, se propone como objetivo de apoyo la regeneración del secano tradicional, de superficies forestales y de otros usos de interés en un territorio que ha perdido su vegetación original y parte de su identidad paisajística.

El fin del PEAG es la consecución de estos retos manteniendo la actividad socioeconómica y el nivel de rentas de la zona y estableciendo los cimientos que permitan un uso sostenible de los recursos hídricos, según se recoge en la Tabla A.17.

Tabla A.17. Objetivos ambientales del PEAG. (Fuente: Adaptado de CHG)

Objetivo ambiental	Problemática asociada
Recuperar los niveles de los sistemas acuíferos y restablecer de forma permanente de las conexiones entre éstos y los cauces fluviales y humedales	Sobreexplotación de acuíferos
Conseguir un régimen de aportaciones mínimo (30 hm <sup>3</sup> ) para conservar las características del PNTD	Sobreexplotación de acuíferos
Transformar los cultivos y los sistemas de riego para reducir de forma efectiva las dotaciones y el consumo	Sobreexplotación de acuíferos
Controlar el volumen de agua realmente utilizado	Sobreexplotación de acuíferos
Restablecer la superficie de humedales desaparecida	Pérdida y degradación de ríos y humedales
Recuperar la longitud fluvial perdida y mantener un régimen de caudales y una calidad del agua que permita la recuperación de la biocenosis fluvial	Pérdida y degradación de ríos y humedales
Revertir el efecto de antiguos dragados sobre la red fluvial	Pérdida y degradación de ríos y humedales
Restablecer el ecosistema de las llanuras de inundación de los ríos Gigüela, Záncara y Riansares	Pérdida y degradación de ríos y humedales
En los humedales protegidos, recuperar las orlas de vegetación perlagunar desaparecidas como consecuencia de la actividad agrícola	Pérdida y degradación de ríos y humedales
Establecimiento de un sistema de seguimiento del nivel y calidad del agua de los humedales	Pérdida y degradación de ríos y humedales
Reducir la contaminación difusa de los acuíferos	Deterioro de la calidad de las aguas
Mejorar la calidad del agua de los humedales incluidos en áreas protegidas	Deterioro de la calidad de las aguas
Reducir la superficie en regadío en coherencia con las medidas adoptadas dentro del Plan	Transformación del paisaje

### **A.3.6. El cambio de visión y retos de futuro**

El análisis de la variación de las políticas hídricas vigentes en el país y más particularmente de las medidas aplicadas sobre la Cuenca Alta del Guadiana muestra un enorme cambio conceptual en los criterios seguidos en la gestión del agua.

De forma tradicional, se puede considerar que el agua ha sido considerada como un recurso productivo obviándose su conexión con el régimen hidrológico natural. En este sentido, las aguas subterráneas se han gestionado de forma análoga a cualquier recurso minero, siendo su propiedad de quien fuese capaz de encontrarlas y alumbrarlas y tratándose los acuíferos como yacimientos explotados de forma comunal, no teniéndose en cuenta, en ningún momento, la existencia de una relación directa entre el flujo subterráneo y la hidrología superficial. Dentro de esta línea, las zonas húmedas no han sido apreciadas, desde una perspectiva histórica, en función de sus valores intrínsecos (ecosistémicos, hidrológicos, económicos, paisajísticos, estéticos,...) sino que por el contrario han sido drenadas y degradadas de forma sistemática con objeto de “sanear” sus márgenes y ganar terreno para la agricultura.

Las políticas hídricas en España durante el siglo XX han estado centradas en la promoción y construcción de grandes obras hidráulicas (Naredo y Esteban, 2004) con objeto de satisfacer las exigencias de agua de la población y conseguir la transformación de extensas zonas agrícolas en zonas regables, garantizando el suministro en un entorno como el nuestro, caracterizado por su carácter árido o semiárido y sujeto a periodos de sequía que pueden extenderse durante, incluso, años.

En la Cuenca Alta del Guadiana, además, la iniciativa privada de miles de agricultores, fomentada desde diferentes administraciones pero sin apenas control ni ayuda tecnológica desde ningún organismo público, ha ocasionado una rápida extensión de las captaciones de aguas subterráneas. Se ha demostrado que en la zona, el agua subterránea es barata y fácilmente accesible, permitiendo a través de su explotación rendimientos económicos muy superiores a los que tradicionalmente son obtenidos en cultivos de secano, lo que unido a una falta de regulación ha motivado que el crecimiento de las extracciones haya sido desordenado, ausente de criterios técnicos y difícil de controlar.

En casi todos los casos estos usuarios no han estado directamente subvencionados con dinero público, por lo que deben recuperar los costes de instalación, operación y mantenimiento, lo que explica su preocupación por amortizar la inversión realizada. Sin embargo, la mayor parte de las veces los usuarios de aguas subterráneas no pagan los costes indirectos o externalidades que ocasionan, que son traspasados directamente a la sociedad (Sahuquillo *et al*, 2006).

La mejora del conocimiento hidrogeológico en relación al funcionamiento de los sistemas acuíferos y el aumento de la conciencia ecológica experimentado a lo largo del siglo

pasado generó una elevada inquietud por los efectos que la política hídrica y la sobreexplotación de acuíferos estaba teniendo sobre los ecosistemas acuáticos y la hidrología superficial y sentó las bases para la modificación de la Ley de Aguas, que en 1985 pasó a considerar las aguas subterráneas parte del Dominio Público Hidráulico como integrantes del ciclo hidrológico.

Esta Ley seguramente llegó tarde para la Cuenca Alta del Guadiana, ya que el impacto sobre el medio hídrico había sido ya muy considerable por causa, principalmente, de la sobreexplotación de los sistemas acuíferos. La situación de sobredemanda sobre los recursos subterráneos resulta complicada de revertir y gestionar, al producirse por la acción separada de miles de usuarios con diferentes prioridades y tener, por otro lado, efectos positivos sobre el desarrollo socioeconómico de la zona.

El esfuerzo llevado a cabo para la reducción de las extracciones y la consecución de un estado de uso sostenible de los recursos subterráneos ha sido muy importante, habiéndose centrado en la declaración de sobreexplotación de acuíferos, en la aprobación y puesta en marcha de regímenes de explotación, en la elaboración de un inventario de captaciones y derechos existentes y en la adopción de medidas legales contra usuarios que se encontrasen detrayendo volúmenes por encima de los inscritos en su concesión.

La aprobación de la Directiva Marco de Aguas ha supuesto un reconocimiento definitivo de la percepción del valor del agua por las sociedades modernas. Además de fomentar cambios en el marco legislativo, la DMA ha sido la impulsora de la redacción de un Plan Especial para la Cuenca Alta del Guadiana cuyo objetivo principal es la adopción conjunta de una serie de medidas y programas orientados a la recuperación del buen estado ecológico del sistema hídrico. El PEAG supone al mismo tiempo una oportunidad y un enorme reto para realmente evaluar si la concepción de la política hídrica desarrollada por planificadores y gestores resulta adoptada con éxito por el conjunto de usuarios con intereses consuntivos o indirectos en el recurso.

En este sentido, varios autores advierten que los problemas de gestión de las aguas subterráneas se deben más la falta de voluntad política para aplicar la legislación vigente que a deficiencias del ordenamiento jurídico (Llamas, 2008). Por ello, aparte de una mayor coordinación y consenso real en los objetivos y prioridades de actuación para su consecución, por parte de todas las administraciones implicadas de una forma u otra en la gestión hídrica y agrícola, se requiere un aumento de la subsidiaridad, el fomento de la participación pública (Schlager y López-Gunn, 2006; Naredo y Estevan, 2004) y un análisis más detallado del balance económico entre costes y beneficio aplicado a la toma de decisiones (Bastida, 2005).

La asimilación de nuevos valores basados en el aumento del conocimiento científico y tecnológico puede ser complicada para políticos, gestores y usuarios en general, lo cual conlleva el peligro de una escasa aceptación o una lentitud en la aplicación de medidas

necesarias. Por este motivo, la gestión debe ser participativa por parte de todos los usuarios a través de las Comunidades de Usuarios de Aguas Subterráneas (CUAS), y debe suponer corresponsabilidad (Sanz, 1998; Sahuquillo *et al*, 2006). Este factor resulta crítico ya que el número de usuarios directos resulta muy elevado, existiendo hasta la fecha un fuerte grado de independencia entre ellos. Por otro lado, las organizaciones con diversos intereses en el agua representan a un número creciente de personas que ejercen una importante presión social dirigida a la sostenibilidad de la gestión hídrica y a una mayor compatibilidad entre diferentes usos.

Dada la gravedad del problema hídrico existente en la Cuenca Alta del Guadiana, el éxito de las posibles soluciones planteadas dependerá tanto de la existencia de una voluntad política firme que apoye a las instituciones encargadas de la gestión y ejecución de las medidas sobre el medio hídrico, como de la participación y capacidad de representación y autogestión que sean capaces de alcanzar las comunidades de usuarios.

Dentro de este escenario, la existencia de metodologías aceptadas desde todos los ámbitos para la determinación de la distribución anual de las superficies y tipos de cultivo regados dentro de los perímetros sobreexplotados, resulta un elemento de gran importancia para la colaboración entre Administración y CUAS. La existencia de mapas de cultivos regados sirve para disponer de una información básica para la gestión, de gran interés para la toma de decisiones a diferentes escalas, que resulta contrastable y que puede ser fácilmente sometida a información pública y, en este punto, validada y enriquecida a través de la participación de los usuarios.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILERA, F. (2006): "Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares", *GeoFocus* (Artículos), nº 6, pp. 81-112. ISSN:1578-5157.

ALEXANDRIDIS, T.K., ZALIDIS, G.C. y SILLEOS, N.G. (2008): "Mapping irrigated area in Mediterranean basins using low cost satellite Earth Observation". *Computers and Electronics in Agriculture*, vol 64, issue 2: pp. 93-103. 2008. ISSN: 0168-1699.

ALLAN, J.A. (1990): "Sensors, platforms and applications; acquiring and managing remotely sensed data". In STEVEN, M.D. and CLARK, J.A. (eds.): *Applications of remote sensing in agriculture*. Nottingham, Butterworths press, 1990. ISBN: 0-408-04767-4.

ALLEN, R.G., SMITH, M., PERIRA, L.S., RAES, D. y WRIGHT, J.L. (2000): "Revised FAO procedures for calculating evapotranspiration" Irrigation and drainage paper n. 56, *Proceedings of the ASCE Watershed Management Conference*, Ft. Collins, CO, p. 10.

ALMODOVAR, A. and ELVIRA, B. (1994): "Further research on the fish fauna catalogue of the Natural Park of Ruidera lakes (Guadiana river basin, central Spain)". *Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, vol 25: pp. 2173-2177. 1994. <<http://www.ucm.es/info/zoo/Vertebrados/elvira/Almodovar1994.pdf>><sup>a</sup>

ALVÁREZ, R., HUETE, J., LÓPEZ, M., BEA, M., FERNÁNDEZ, L. y MONTESINOS, M. (2006): "Integración de nuevos métodos de diagnóstico en la gestión de información agrícola para mejorar la rentabilidad y la sostenibilidad". *Fruticultura profesional*, n. 161: pp. 81-88. 2006. ISSN: 1131-5660

ÁLVAREZ-COBELAS, M., MONTERO, E., CIRUJANO, S., y MORENO, M. (2009). *El origen del Guadiana, desvelado tras 2.000 años de discusiones*. Alcázar de San Juan, Consorcio Alto Guadiana, 2009. <[http://www.humedalesibericos.com/sesiones/humedales1/web/moreinfo/sp\\_2.pdf](http://www.humedalesibericos.com/sesiones/humedales1/web/moreinfo/sp_2.pdf)>

ARAGÓN, J.R. (2008): "Reflexiones sobre la degradación experimentada en la cuenca alta del río Guadiana en las últimas décadas y propuestas para abordar los cambios de tendencia con carácter inmediato". *Actas del VI Congreso Ibérico sobre gestión y planificación del agua*. Vitoria, 2008.

ASRAR, G., FUCHS, M., KANEMASU, E.T. and HATFIELD, J.L. (1984): "Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat". *Agronomy Journal*, vol 76: p. 300-306. 1984.

---

<sup>a</sup> Todas las direcciones electrónicas, citadas en este apartado de referencias bibliográficas, se encontraban disponibles online según consulta de diciembre de 2010.



BARBA-ROMERO, S. y POMEROL, J. (1997). *Decisiones multicriterio. Fundamentos teóricos y utilización práctica*. Alcalá de Henares, Servicio de publicaciones de la Universidad de Alcalá.

BARBOSA, P.M., CASTERAD, M.A. and HERRERO, J. (1996): "Performance of several Landsat 5 Thematic Mapper (TM) image classification methods for crop extent estimates in an irrigation district". *International Journal of Remote Sensing*, vol 17: pp. 3665-3674. 1996.

BARET, F. and GUYOU, G. (1991): "Potentials and Limits of Vegetation Indices for LAI and APAR Assessment". *Remote Sensing of Environment*, vol 35: pp. 161 – 173. 1991.

BARÓN, A. (1999): "Experiencia sobre la evaluación de las extracciones de agua subterránea en las Islas Baleares". En BALLESTER *et al* (eds.): *Medida y evaluación de las extracciones de aguas subterráneas*: pp. 43-54. Madrid, ITGE, 1999. ISBN: 84-7840-361-2.

BASANTA, L. (1986). *Fauna de Castilla La Mancha. Aves*. Junta de Castilla-La Mancha. Toledo, 1986.

BASANTA, L. (1989). *Estudio inventario sobre la evolución y la ecología de las zonas húmedas de Castilla La Mancha*. Consejería de Agricultura de la Junta de Comunidades de Castilla La Mancha, 1989.

BASTIAANSSEN, W., MOLDEN, D.J., y MAKIN, I.W. (2000): "Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications". *Agricultural Water Management*, vol 46, issue 2: pp. 137-155. 2000.

BASTIDA, G. (2005): "Nueva cultura, valores y gobierno del agua". Newsletter del IDGP de ESADE, nº 6. Septiembre de 2005.

<<http://www.esade.edu/public/modules.php?name=news&idnew=184&idissue=31&newlang=spanish>>

BAUSCH, W., and NEALE, C.M.U. (1987): "Crop Coefficients Derived From Reflected Canopy Radiation. A Concept". *Transactions of the ASAE*, 30 (3): pp. 703-709. 1987.

BEA, M., MONTESINOS, S. y BENÍTEZ, A. (2003): "Application of remote sensing techniques for the groundwater extractions management in Mancha Occidental aquifer". *Proceedings of 6<sup>th</sup> Inter-Regional Conference on Environment-Water*. Albacete, 2003. ISBN: 84-688-3144-1.

BEA, M., MONTESINOS, S., MORUGÁN, C., y MORALEDA, S. (2010): "Análisis comparativo de las superficies regadas en los acuíferos del Campo de Montiel y de La Mancha Occidental en el periodo 2004-2008". *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, n. 34, pp. 22-28. 2010. ISSN: 1988-8740.

<[http://www.aet.org.es/revistas/revista34/Numero34\\_03.pdf](http://www.aet.org.es/revistas/revista34/Numero34_03.pdf)>

- BLAS, L. (1988). *Parques Nacionales Españoles*. Biblioteca Iberoamericana. Madrid, Editorial Anaya, 1988.
- BOUMAN, B.A.M. (1995): "Crop modelling and remote sensing for yield prediction". *Netherlands journal of agricultural science*, vol 43: pp. 143-161. 1995.
- BOSQUE, J., DÍAZ, M.A., GÓMEZ, M., RODRÍGUEZ-ESPINOSA, V.M., RODRÍGUEZ-DURÁN, A.E. y VELA, A. (1999): "Un procedimiento, basado en SIG, para localizar centros de tratamientos de residuos". *Anales de Geografía de la UCM*, vol 19: pp. 295-323. Universidad Complutense de Madrid, 1999.
- BRAMLEY, R.G.V., and LAMB, D.W. (2003): "Making sense of vineyard variability in Australia". In ORTEGA, R. and ESSER, A. (eds.): *Proceedings of IX Congreso Latinoamericano de Viticultura y Enología*: pp. 35-54. Santiago, Universidad Católica de Chile, 2003.
- BROMLEY, J. (1996): "Hydrological response to land use change and over-exploitation of water resources in a semiarid area of Spain". BROMLEY J. (Ed). In *EFEDA II, Hydrology group. Final report*: pp. 1.1 – 1.62. 1996
- BROMLEY, J., CRUCES, J., ACREMAN, M., LLAMAS, M.R. y MARTÍNEZ CORTINA, L. (2001): "Problems of sustainable management in an area of overexploitation: The Upper Guadiana catchment, Central Spain". *Water Resources Development*, vol17: pp.379-396. 2001.
- CACHORRO, V., BERJÓN, A.J., GUERRERO, A. y CID, J. (2001): "Comparación de distintos métodos de clasificación para la discriminación de cultivos en regadío". En MARTÍNEZ-CASASNOVAS, J.A. y ROSELL, J.I. (eds.): *Teledetección: medio ambiente y cambio global*. Lleida, Universidad de Lleida, 2001. ISBN: 84-9743-001-8.
- CALDER, I.R. (1976): "The measurement of water losses from a forested area using a natural lysimeter". *Journal of Hidrology*, vol 30(4): pp. 311-325. 1976.
- CALERA, A., REYES J., MARTÍNEZ, C., y SÁNCHEZ, J. (1999): "Seguimiento de los cultivos en regadío en la Mancha Oriental desde 1982 a 1997, utilizando imágenes TM y MSS, en combinación con herramientas SIG". *Revista de la Asociación Española de Teledetección* n. 12. 1999. <<http://www.aet.org.es/?q=revista12-10>>
- CASTERAD, M.A. y MARTÍN-ORDOÑEZ, T. (2004): "Optimization of supervised classification procedure for irrigated crop discrimination using Landsat TM images". *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, n. 22: pp. 33-39. 2004. <<http://www.aet.org.es/?q=revista22-5>>
- CEBALLOS, A. y LÓPEZ-BLANCO, J. (2003): "Delineation of suitable areas for crops using a Multi-Criteria Evaluation approach and land use/cover mapping: a case study in Central Mexico". *Agricultural Systems*, vol 77(2): pp. 117-136. 2003.

- CHANG Y., YAOZHONG P. and JINSHUI Z. (2008): "An Integrated Approach to Agricultural Crop Classification Using SPOT5 HRV Images". *Computer and Computing Technologies In Agriculture*, nº 258, vol I: pp. 677-684. 2008. ISBN 978-0-387-77250-9.
- CHAVEZ, P.S. (1996): "Image-Based Atmospheric Corrections Revisited and Improved", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, n. 62, pp. 1025-1036. 1996
- CHEN, Y., KHAN, S. y PAYDAR, Z. (2010): "To retire or expand? A fuzzy GIS-based spatial multi-criteria evaluation framework for irrigated agriculture". *Irrigation and drainage*, vol 59, issue 2: pp. 174-188. John Wiley & Sons, 2010.
- CHG, CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA. (1993). *Plan Hidrológico de cuenca: Memoria*. Ministerio de Medio Ambiente, 1993.
- CHG, CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA (1995). *Control de urgencia del Régimen de Explotación del recurso hidráulico de los acuíferos de la Mancha Occidental y del Campo de Montiel*. Estudio interno. 1995.
- CHG, CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA (1996a). *Planteamiento de futuras actuaciones para la solución de los problemas hídricos del territorio de la cuenca alta del Guadiana relacionado con los acuíferos de La Mancha Occidental y Campo de Montiel*. Ministerio de Medio Ambiente. 1996.
- CHG, CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA (1996b): "El problema hidráulico de la Cuenca Alta del Guadiana". Informe interno, redactado por ARAGÓN, J.R., 1996.
- CHG, CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA (1996c): "Problemática del análisis de las solicitudes de aprovechamientos de aguas subterráneas". Informe interno, 1996.
- CHG, CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA (2005). *Trabajos sobre los Artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea en la cuenca del Guadiana y en los ámbitos complementarios de los ríos Tinto, Odiel y Piedras*. Ministerio de Medio Ambiente. 2005.
- <[http://planhidrologico2009.chguadiana.es/corps/planhidrologico2009/data/resources/file/art\\_5\\_6/cap10.pdf](http://planhidrologico2009.chguadiana.es/corps/planhidrologico2009/data/resources/file/art_5_6/cap10.pdf)>
- CHG, CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA (2006). *Usos económicos del agua en la cuenca del Guadiana. Capítulo VIII para el Plan Hidrológico de cuenca de 2009*. Ministerio de Medio Ambiente. 2006.
- CHG, CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA (2007): *Evaluación Ambiental Estratégica (EAE) del Plan Especial del Alto Guadiana*. Ministerio de Medio Ambiente. 2007.

CHG, CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL GUADIANA (2008). *Plan Especial del Alto Guadiana*. Ministerio de Medio Ambiente. Aprobado por Real Decreto 13/2008, de 11 de enero de 2008.

<<http://www.chguadiana.es/?url=32&corp=chguadiana&lang=es>>

CHUVIECO, E. (2008). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Editorial Ariel, 2008, 3ª edición actualizada.

CIRUJANO, S. (1992). *Criterios botánicos para la valoración de las lagunas y humedales españoles (Península Ibérica y Baleares)*. Madrid, ICONA-CSIC, 1992.

CIRUJANO, S. (1996). *Las Tablas de Daimiel. Ecología acuática y sociedad*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Dirección General de conservación de la Naturaleza, 1996.

CLARK, W.A., and HOSKING, P.L. (1986). *Statistical Methods for Geographers*, (Chapter 13). New York, John Wiley & Sons, 1986.

CLEVERS, J.G. and VERHOEF, P.W. (1993): "LAI estimation by means of the WDV. A sensitivity analysis with a combined PROSPECT-SAIL". *Remote Sensing of Environment*, vol7: pp. 43 – 64. 1993.

COHEN, Y. and SHOSGANY, M. (2002): "A national knowledge-based crop recognition in Mediterranean environment". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol 4(1): pp. 75-87. 2002.

CRUCES, J., CASADO, M., LLAMAS, M.R., DE LA HERA, A. y MARTÍNEZ CORTINA, L. (1997): "El desarrollo sostenible en la cuenca Alta del río Guadiana: aspectos hidrológicos". *Revista de Obras Públicas*, n. 3362: pp. 7-18. 1997.

CRUCES, J., HERNÁNDEZ, J.M., LÓPEZ-SANZ, G. y ROSELL, J. (1998). *De la noria a la bomba: conflictos sociales y ambientales en la cuenca alta del Guadiana*. Colección Nueva Cultura del Agua. Bilbao, 1998.

CRUCES, J. y MARTÍNEZ CORTINA, L. (2000): "La Mancha Húmeda: explotación intensiva de las aguas subterráneas en la cuenca alta del río Guadiana". *Proyecto Aguas Subterráneas, Papeles de la Serie A: Uso intensivo de las aguas subterráneas: retos ecológicos, tecnológicos y éticos, nº 3*. Madrid, Fundación Marcelino Botín, 2000.

<[http://www.fundacionmbotin.org/fileadmin/user\\_upload/ObservatorioAgua/Publicaciones/Proyecto\\_PAS/A-3.pdf](http://www.fundacionmbotin.org/fileadmin/user_upload/ObservatorioAgua/Publicaciones/Proyecto_PAS/A-3.pdf)>

DANTÍN, J. (1932): "La población de La Mancha española en el centro de su máximo endorreísmo". *Boletín de la Real Sociedad de Geografía Nacional*, vol 72(1): pp. 25-45. 1932.

DE JUANA, E. y VARELA, J. M. (2005). *Aves de España*. Barcelona, Lynx Ediciones, 2005.

DELENNE, C, DURRIEU, S., RABATEL, G., DESHAYES, M., BAILLY, J.S., LELONG, C. and COUTERON, P. (2008): "Textural approaches for vineyard detection and characterization using very high resolution remote sensing data" *International Journal of Remote Sensing*, vol 29, issue 4: pp. 1153-1167. 2008. ISSN: 0143-1161.

D'URSO, G. (2001). *Simulation and management of on-demand irrigation systems: a combined agrohydrological and remote sensing approach*. Wageningen, 2001. ISBN: 90-5808-399-3. Doctoral thesis.

EASTMAN, J.R., KYREM, P.A.K., TOLEDANO, J. & JIN, W. (1993): "A procedure for multi-objective decision making in GIS under conditions of competing objectives", In *Proceedings of EGIS'93*: pp 438-447. 1993.

ESPALVER, J. (1994):. *Las lagunas manchegas, valores ecológicos, problemática ambiental y propuesta de conservación*. Ciudad Real, 1994.

ERENA, M. (2006): "Cálculo de la demanda agraria mediante SIG y Teledetección: Aplicación al Campo de Cartagena". Master Universitario: Planificación y Gestión de recursos hídricos vol 2: p. 315-330. Universidad de Murcia. 2006

ERENA, M., PÉREZ, P., MONTESINOS, S., BEA, M., SÁNCHEZ, S., GONZÁLEZ, M., RUÍZ, L.A., RECIO, J. y HERMOSILLA, T. (2009): "Ensayos para la estimación de daños producidos por heladas y sequía en cítricos mediante imágenes de muy alta resolución espacial". En MONTESINOS, S. y FERNÁNDEZ, L. (ed): *Teledetección: agua y desarrollo sostenible*. Calatayud, AET, 2009.

EUROPEAN COMMISSION. (1999): *ASTIMwR: Application of Space Techniques to the Integrated Management of river basin Water Resources. Final Report*". Montesinos, S. y Castaño, S. (eds), 1999. ISBN: 84-605-9867-5.

FAO: UNITED NATIONS FOOD AND AGRICULTURE ORGANISATION. (2006). *Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Estudios FAO de riego y drenaje n. 56. ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D. and SMITH, M. (coords.). Roma, 2006.

FASSNACHT, K.S. and GOWER, S.T. (1997): "Interrelationships among the edaphic and stand characteristics, leaf area index, and aboveground net primary production of upland forests ecosystems in north central Wisconsin". *Canadian Journal for Research*, vol 27: pp. 1058-1067. 1997.

FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1991): "El clima". En: *La provincia de Ciudad Real I. Geografía*: p. 69-110. Ciudad Real, Biblioteca de Autores y Temas Manchegos, 1991.

FERNÁNDEZ LOP, A. (1996). *Humedales manchegos en peligro por la gestión del agua en la Cuenca Alta del Guadiana*. WWF-Adena, Informe técnico. 1996.

<[http://assets.wwfspan.panda.org/downloads/humedales\\_manchegos\\_1996.pdf](http://assets.wwfspan.panda.org/downloads/humedales_manchegos_1996.pdf)>

FLORÍN, M. (2001). *Ecología y conservación de La Mancha Húmeda*. Toledo, Diputación provincial de Toledo, 2001. ISBN: 84-87103-91-X.

GALLEGO, F.J. (1999): "Crop area estimation in the MARS project". In: *Proceedings of Conference on ten years of MARS project*. Brussels, 1999. <[www.ec-gis.org/docs/F18163/AREAESTMARS10Y.pdf](http://www.ec-gis.org/docs/F18163/AREAESTMARS10Y.pdf)>.

GALLEGO, F.J. (2004): "Remote sensing and land cover area estimation". *International Journal of Remote Sensing*, vol 25, issue 15: pp. 3019 – 3047. 2004

GANDÍA, S. y MELIÁ, J. (1990). *La Teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: agricultura*. Valencia, Universidad de Valencia, 1990. ISBN: 84-370-0835-2.

GANDÍA, S. (1990): "Interacción de la radiación solar con las superficies naturales". En GANDÍA, S. y MELIÁ, J. (eds.): "*La Teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: agricultura*", pp. 85-94. Valencia, Universidad de Valencia, 1990. ISBN: 84-370-0835-2.

GAO, B. (1996): "NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space". *Remote Sensing of Environment*, vol 58(3): pp. 257-266. 1996.

GARCÍA DEL CURA, M.A., GONZÁLEZ-MARTÍN, J.A., ORDÓÑEZ, S. y PEDLEY, M. (1997): "Las Lagunas de Ruidera". En GARCÍA-RAYEGO, J.L. y GONZÁLEZ-CÁRDENAS, E. (Coords.): *Elementos del medio natural en la provincia de Ciudad Real*: pp. 83-130. Colección Estudios. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Castilla La Mancha, 1997. ISBN: 84-89492-81-6.

GARCÍA-HARO, F.J., GILABERT, M.A., Y MELIÁ, J. (1996): "Linear spectral mixture modelling to estimate vegetation amount from optical spectral data". *International Journal of Remote Sensing*, vol 17: p. 3373-3400. 1996

GEO – Group of Earth Observations (2007): "Developing a Strategy for Global Agricultural Monitoring in the Framework of Group on Earth Observations Workshop Report". FAO, Rome, 16-18 July 2007.

<[http://www.earthobservations.org/documents/cop/ag\\_gams/200707\\_01/20070716\\_geo\\_i\\_gol\\_ag\\_workshop\\_report.pdf](http://www.earthobservations.org/documents/cop/ag_gams/200707_01/20070716_geo_i_gol_ag_workshop_report.pdf)>

GILABERT, M.A., SEGARRA, D. y MELIÁ, J. (1990): "A simplified algorithm for the evaluation of frost-affected citrus". In STEVEN, M.D. and CLARK, J.A. (ed): *Applications of remote sensing in agriculture*. Nottingham, Butterworths press, 1990. ISBN: 0-408-04767-4.

GILABERT, M.A., GANDIA, S. and MELIA, J. (1996): "Analysis of Spectral Biophysical Relationships for a Corn Canopy". *Remote Sensing of environment*, vol 55: pp. 11-20. 1996.



- GILABERT, M.A., GONZÁLEZ-PIQUERAS, J. y GARCÍA-HARO, J. (1997): "Acerca de los índices de vegetación". *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, n. 8. 1997. <<http://www.aet.org.es/?q=revista8-4>>
- GÓMEZ, M. y BARREDO, J.I. (2005). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid, RA-MA Editorial, 2005. 2ª Edición actualizada. ISBN: 84-7897-673-6.
- GÓMEZ LIMÓN, J.A., RIESGO, L., y ARRIAZA, M.: (2003): "Multi-criteria analysis of factors use level: the case of water for irrigation" *Proceedings of 25<sup>th</sup> International Conference of Agricultural Economist*. Durban, South Africa, 2003.
- GONCALVES, J.M., PEREIRA, L.S., FANG, S.X. y DONG, B. (2007): "Modelling and multicriteria analysis of water saving scenarios for an irrigation district in the upper Yellow River Basin". *Agricultural Water Management*, vol 94: pp. 93-108. 2007.
- GONZÁLEZ-DUGO, M.P., MATEOS, L. y DÍAZ, A. (2009): "Estimación del consumo de agua en zonas regables mediante series temporales de imágenes de satélite". En MONTESINOS, S. y FERNÁNDEZ, L. (eds.): *Teledetección: agua y desarrollo sostenible*. Calatayud, AET, 2009.
- GONZÁLEZ MARTÍN, J.A., ORDÓÑEZ, S. y GARCÍA DEL CURA, M.A. (1987): "Evolución geomorfológica de las Lagunas de Ruidera (Albacete - Ciudad Real)". *Estudios Geológicos*, vol 43(3-4): pp. 227-239. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 1987.
- GONZÁLEZ-PIQUERAS, J. (2006). *Evapotranspiración de la Cubierta Vegetal mediante la determinación del coeficiente de cultivo por teledetección. Extensión a escala regional: acuífero 08.29, Mancha Oriental*. Valencia, Universidad de Valencia, 2006. Tesis doctoral.
- GOWER, S.T., KUCHARIK, C.J. and NORMAN, J.H. (1999): "Direct and indirect estimation of LAI,  $f_{APAR}$ , and net primary production of terrestrial ecosystems". *Remote Sensing of Environment*, vol 70: pp. 29-51. 1999.
- GRANDE, F. (1997): "Hidrogeología". En GARCÍA-CANSECO (ed.): *Parque Natural de las Lagunas de Ruidera*: pp. 52-68. Ecohábitat. 1997.
- GUMIEL J.C., FABREGAT, V., ANTÓN-PACHECO, C., y SÁNCHEZ, E. (1999): "Clasificación de imágenes Landsat TM para la estimación de superficies en regadío en la Vega Baja y Campo de Elche". *Revista de la Asociación Española de Teledetección* nº 12. 1999. <<http://www.aet.org.es/?q=revista12-7>>
- HALL A., LAMB D.W., HOLZAPFEL B. and LOUIS J. (2002): "Optical Remote Sensing applications in viticulture: A review". *Australian Journal of Grape and Wine Research*, nº 8: pp. 36-47. 2002.



- HARALICK, R. M., K. SHANMUGAM AND I. DINSTEIN. (1973): "Textural Features for Image Classification". *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, vol 3(6). 1973
- HUETE, A.R. (1988): "A soil adjusted vegetation index (SAVI)". *Remote sensing of environment*, vol 25: pp. 295-309. 1988.
- IGME, INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. (1979): "Investigación hidrogeológica de la cuenca alta del río Guadiana". Informe técnico n. 7. Madrid, Instituto Geominero de España, 1979.
- IGME, INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. (1981): "Estudio de los recursos subterráneos de la Cuenca Alta del Guadiana. Sistemas acuíferos 19, 20, 21, 22, 23 y 24". Informe técnico n. 23. Madrid, Instituto Geominero de España, 1981.
- IGME, INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA. (1999). *Unidades hidrogeológicas de España. Mapa y datos básicos*. Madrid, Instituto Geológico y Minero de España, 1999.
- JANSSEN, L.L.F. and MIDDELKOOP, H. (1992): "Knowledge-based crop classification of a Landsat Thematic Mapper image". *International Journal of Remote Sensing*, vol 13: pp. 2827-2837. 1992.
- JOHNSON L.F., BOSCH D.F., WILLIAMS D.C. and LOBITZ B.M. (2001): "Remote Sensing of Vineyard management zones: implications for Wine Quality". *Applied Engineering in Agriculture*, vol 17(4): pp. 557-560. 2001.
- KANEMASU, E.T., DEMETRIADES-SHAH, T.H, and SU, H. (1990): "Estimating grassland biomass using remotely sensed data". In STEVEN, M.D. and CLARK, J.A. (eds.): *Applications of remote sensing in agriculture*. Nottingham, Butterworths press, 1990. ISBN: 0-408-04767-4.
- KOGAN, F.N. (1995): "Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection". *Advances in Space Research*, vol 15, issue 11: pp. 91-100. 1995.
- LANJERI, S., MELIÁ, J., y SEGARRA, D. (2001): "A multitemporal masking classification method for vineyard monitoring in central Spain". *Internacional Remote Sensing*, vol 22: pp. 3167-3186. 2001.
- LARK, R.M. (1995): "A reappraisal of unsupervised classification". *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, issue 8: pp. 1425-1460. 1995.
- LILLESAND, T.M. and KIEFER, R.W. (1979). *Remote Sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons Ed., 1979.
- LLAMAS, M.R. (1994): "Four case studies of real or pretended conflicts between groundwater exploitation and wetlands conservation". *Proceedings of Water Down Under 94*: pp. 493-497. Institution of Civil Engineers of Australia, Barton, Australia, 1994. ISBN: 85825 607X.

- LLAMAS, R.M. and MARTÍNEZ-SANTOS, P. (2005): "Project NEWATER. Baseline condition report: Upper Guadiana basin". Report WB3 in Newater Project, WP 3.4. 2005. <<http://www.newater.uos.de/intern/sendfile.php?id=39>>
- LLAMAS, M.R. (2006): "La contribución de los avances científicos a la solución de los conflictos hídricos". Publicado por la Universidad de Alicante como lección magistral en el acto de clausura del curso académico 2005-2006. 14 de junio de 2006.
- LLAMAS, M.R. (2008): "¿Por qué es todavía tan deficiente la gestión de las aguas subterráneas españolas?". En LÓPEZ-GETA, J.A., LOREDO, J., FERNÁNDEZ, L. y PERNÍA, J.M. (eds): *Investigación y gestión de los recursos del subsuelo*, pp 565-582.
- LOBITZ B., JOHNSON L., HLAVSKA C., ARMSTRONG R and BELL C. (1997): "Grapevine Remote Sensing Analysis of Phylloxera Early Stress (GRAPES): Remote Sensing analysis summary". NASA Technical Memorandum No.112218. Hanover, NASA Center for AeroSpace Information, 1997.
- LOBO, A., CHIC, O., CASTERAD, M.A. y SOLÉ, L. (2005): "Estudio de la información aportada por las imágenes radar ERS-1.SAR.PRI a las TM para la identificación de cultivos". *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, nº 4. 2005. <<http://www.aet.org.es/?q=revista4-7>>
- LÓPEZ-CAMACHO, B. (1987): "Hidrología de las Tablas de Daimiel". Real Academia de Ciencias. *Seminario sobre las bases científicas para la protección de los humedales de España*: pp. 209-215. 1987.
- LÓPEZ-GETA J.A. (2006). *Aguas subterráneas. Un recurso natural del subsuelo*. Educación Ambiental. Madrid, IGME, UNESCO y Fundación Marcelino Botín, 2006. ISBN: 84-7840-618-1.
- LÓPEZ-GRANADOS, F., PEÑA-BARRAGÁN, J. M., JURADO-EXPÓSITO, M., FRANCISCO-FERNÁNDEZ, M, CAO, R., ALONSO-BETANZOS, A., AND FONTELA-ROMERO, O. (2008): "Multispectral classification of grass weeds and wheat (*Triticum durum*) crop using linear and nonparametric functional discriminant analysis, and neural networks". *Weed Research*, vol 48: pp 28-37. SCI. 2008
- LÓPEZ-LOZANO, R. CASTERAD, M.A. y HERRERO-ISERN, J. (2008): "Relación entre desarrollo del cultivo, rasgos edáficos y rendimiento en una parcela de maíz mediante teledetección y SIG". *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, nº 28. 2008. <<http://www.aet.org.es/?q=revista28-108>>
- LOSADA, J.A., MONTESINOS, S., OMEDAS, M., GARCÍA-VERA, M.A. y GALVÁN, R. (2004): "Cartografía de las inundaciones del río Ebro en febrero de 2003: Trabajos de fotointerpretación, teledetección y análisis SIG en el GIS-Ebro". *Actas del XI Congreso de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección*, Murcia, 2004. ISBN 84-8371-485-X.

MACDONALD, R.B., BAUER, M.E., ALLEN, J.W., CLIFTON, J.D., ERICSON, J.D. and LANDGREVE, D.A. (1972): "Results of the 1971 Corn Blight Watch Experiments". In: *Proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, vol I: pp. 157-190. Environmental Research Institute of Michigan, 1972.

MACDONALD, R.B., and HALL, F. (1978): "LACIE: an experiment in global crop forecasting". In: *Proceedings of Plenary Session, LACIE Symposium*: pp. 17-48. Houston, NASA Johnson Space Center, 1978.

MAPA: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. (1982). *Calendario de siembra, floración y recolección*. Secretaría general técnica del MAPA. Madrid, 1982.

MAPA, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (1992). *Libro rojo de los vertebrados de España*. BLANCO, J.C. y GONZÁLEZ, J.L. (Eds.). ICONA, 1992.

<[http://www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad/especies\\_amenazadas/vertebrados/libro\\_rojo\\_vert/libro\\_rojo\\_vertvertebrados.htm](http://www.mma.es/portal/secciones/biodiversidad/especies_amenazadas/vertebrados/libro_rojo_vert/libro_rojo_vertvertebrados.htm)>

MARTÍN-ORTEGA, J., y BERBEL, J. (2007): "Método multicriterio para apoyo a la planificación hídrica", *Observatorio medioambiental*, vol 10: pp. 57-77. 2007. ISSN: 1139-1987.

MARTÍNEZ-BELTRÁN, C. and CALERA, A. (2001): "Irrigated crop area estimation using TM Landsat imagery in La Mancha, Spain". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol 67, n. 10: pp. 1177-1184. 2001.

MARTÍNEZ-CASASNOVAS J.A., MARTÍN-MONTERO A. and CASTERAD M.A., (2005): "Mapping multi-year cropping patterns in small irrigation districts from time-series analysis of Landsat TM images". *European Journal of Agronomy*, vol 23: pp. 159-169. 2005.

MARTÍNEZ CORTINA L., (2002): "Marco hidrológico de la cuenca alta del Guadiana". En COLETO, C., MARTÍNEZ-CORTINA L. y LLAMAS, M.R. (eds.): *Conflictos entre el desarrollo de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales*: p. 3-68. Fundación Marcelino Botín. Madrid, Ediciones Mundiprensa, 2002.

MARTÍNEZ CORTINA L. y CRUCES J. (2003): "Análisis del uso intensivo de las aguas subterráneas en la cuenca alta del Guadiana usando un modelo numérico". En LLAMAS, M.R. y CUSTODIO, E. (eds.): *Uso intensivo de las aguas subterráneas: retos y oportunidades*. Taylor & Francis, 2003.

MARTÍNEZ-CORTINA, L. and CRUCES, J. (2005): "The analysis of the intensive use of groundwater in the Upper Guadiana basin, central Spain by using a numerical model". In SAHUQUILLO, A., CAPILLA, J., MARTÍNEZ-CORTINA and SÁNCHEZ-VILLA, X. (eds.): *Groundwater intensive use*: pp. 285-294. Leiden, The Netherlands, Balkema publishers, 2005.

MARTÍNEZ-SANTOS, P., CASTAÑO, S., SANTISTEBAN, J.L., MARTÍNEZ-ALFARO, P.E., MEDIAVILLA, R., y LÓPEZ-PARMO, E. (2004): "Evolución climática durante el

último siglo (1904-2002) en el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel". *Geotemas*, vol 6(5): pp. 129-132. 2004

MMA, Ministerio de Medio Ambiente (2005). *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. Informe final del Proyecto ECCE. Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, 2005.

<[http://www.mma.es/portal/secciones/cambio\\_climatico/areas\\_tematicas/impactos\\_cc/eval\\_impactos.htm](http://www.mma.es/portal/secciones/cambio_climatico/areas_tematicas/impactos_cc/eval_impactos.htm)>

MMA, Ministerio de Medio Ambiente (2005b). *Libro Rojo de las Aves de España*. MADROÑO, A., GONZÁLEZ, C. & ATIENZA, J. C. (coords.). Madrid, Ministerio de Medio Ambiente & SEO/BirdLife, 2004.

MONTERO I., RODRÍGUEZ-PÉREZ A.J., CIFUENTES, V., MARTOS, J.C., MOLINA, F., RODRÍGUEZ-ÁLVAREZ J.A., OYONARTE, N., y MÚÑOZ A. (2005): "Mejoras metodológicas en la estimación por teledetección de la superficie en regadío en la demarcación de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir". *Actas del XI Congreso Nacional de Teledetección*. Puerto de la cruz (Tenerife), 2005.

MONTESINOS, S. (1990). *Teledetección: su utilización en la cuantificación y seguimiento de recursos hidráulicos aplicados al regadío*. Madrid, SGOP, Informaciones y estudios nº 51, 1990. ISBN: 84-7433-662-7.

MONTESINOS, S., DE STEFANO, L., CASTAÑO, S., QUINTANILLA, A., NAVARRO, E., VELA, A., ARAGÓN, J.R. y LUNA, E. (1997): "Aplicación de técnicas de observación de la Tierra a la gestión integral de los recursos hídricos de la cuenca del Guadiana". *Actas del VII Congreso Nacional de Teledetección*: pp. 361-34. Santiago de Compostela, AET, 1997. <[http://www.aet.org.es/congresos/vii/Santiago\\_82.pdf](http://www.aet.org.es/congresos/vii/Santiago_82.pdf)>

MONTESINOS, S. y DE STEFANO, L. (1999): "Aplicación de las técnicas de Teledetección a la gestión integral de recursos hídricos" En CASTAÑO, S. y QUINTANILLA, A. (eds.): *Teledetección: avances y aplicaciones*: pp. 127-130. Diputación de Albacete, 1999.

MONTESINOS, S., MANZANO, R., DE STEFANO, L., LUNA, E. y ARAGÓN, J.R. (1999): "Reconocimiento de aprovechamientos en regadío con aguas subterráneas. Discusión, metodología y marco legal". *Revista de la Asociación Española de Teledetección* n. 12: 1999. <<http://www.aet.org.es/?q=revista12-6>>

MONTESINOS S., BEA, M. y BENÍTEZ, A. (2002): "Hacia una gestión sostenible de los recursos hídricos subterráneos en el acuífero de la llanura manchega. Aplicación de técnicas de teledetección". En: *Actas de las jornadas de 2002 de la AIH. Presente y futuro del agua subterránea en España y la Directiva Marco Europea*. Zaragoza, Asociación Internacional de Hidrogeología – grupo español, 2002.

MONTESINOS, S., BEA, M. y FERNÁNDEZ, L. (2007): “Estimación de las superficies en regadío mediante técnicas de teledetección: conceptos y su aplicación operativa”. *Actas de las Jornadas sobre las Aguas subterráneas en España ante las Directivas europeas: retos y perspectivas*. Santiago de Compostela, Asociación Internacional de Hidrogeología, grupo español, 7 – 9 de noviembre de 2007.

MONTESINOS, S y BEA, M. (2008): “Aplicaciones operativas de la Teledetección en la planificación y gestión del medio hídrico”. *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, nº 29: pp. 91-100. 2008. ISSN: 1988-8740.

<<http://www.aet.org.es/revistas/revista29/Revista-AET-29-9.pdf>>

MONTESINOS, S., ALMAGRO, F. Y URREA, M. (2009): “Estimación de superficies en regadío en la cuenca del Segura mediante Teledetección y SIG”. En MONTESINOS, S. y FERNÁNDEZ, L. (eds.): *Teledetección: agua y desarrollo sostenible*: pp. 145-148. Calatayud, AET, 2009.

MOPTMA, Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente (1994). *Libro Blanco de las aguas subterráneas*. Centro de Publicaciones de la Secretaría General Técnica. 1994.

MURTHY, C.S., RAJU, P.V. and BADRINATH, K.V.S. (2003): “Classification of wheat crop with multi-temporal images: performance of maximum likelihood and artificial neural networks”. *International Journal of Remote Sensing*, vol 24: pp. 4871-4890. 2003.

NAREDO, J.M. Y ESTEVAN, A. (1994). *Ideas y propuestas para una nueva política del agua en España*. Ed. Bakeaz, Centro de Documentación y Estudios para la Paz. 2004. ISBN: 8488949677.

NIÑEROLA, S., TORRENS, J., BATTLE, A. y CALVÍN, J. (1994): “El embalse subterráneo de la Llanura Manchega”. *Actas del Simposio Nacional de Hidrogeología*, Tomo I: pp. 234-253. Valencia, 1976.

OETTER, D.R., COHEN, W.B., BERTERRETCHÉ, M., MAIERSPERGER, T.K. and KENNEDY, R.E. (2001): “Land cover mapping in an agricultural setting using multiseasonal Thematic Mapper data”. *Remote Sensing of the Environment*, vol. 76: pp. 139-155. 2001.

OLMEDO, A. (2002): “La participación ciudadana y las comunidades de usuarios en la gestión de las aguas subterráneas y de los humedales de Castilla La Mancha”. En COLETO, C., MARTÍNEZ-CORTINA L. y LLAMAS, M.R. (eds.): *Conflictos entre el desarrollo de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales*: pp. 325-346. Fundación Marcelino Botín. Madrid, Ediciones Mundiprensa, 2002.

OZDOGAN, M., YANG, Y., ALLEZ, G. & CERVANTES, C. (2010): “Remote sensing of irrigated agriculture: Opportunities and Challenges”. In *Remote Sensing: Special issue in*

*Global Croplands*: pp 2274-2304, 2010. ISSN: 2072-4292. <<http://www.mdpi.com/2072-4292/2/9/2274/>>

PAAGELOW, M., CAMACHO, M.T., MENOR, J. (2003): "Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje", *GeoFocus* (Artículos), n.3: pp. 22-44. 2003. ISSN:1578-5157.

PEARSON, R.L. and MILLER, L. D. (1972): "Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short grass Prairie. Pawnee National Grasslands, Colorado". In *Proceedings of 8<sup>th</sup>. International Symposium on Remote Sensing of Environment*: pp. 1357 – 1381. ERIM, Ann Arbor, MI, 1972.

PEINADO, M. (1980). *Estudio florístico y fitosociológico de la cuenca del Guadiana en la provincia de Ciudad Real*. Universidad Complutense de Madrid, 1980. Tesis doctoral.

PEINADO, M. (1982): "El paisaje vegetal ciudarrealeño". *Cuadernos de estudios manchegos*, n.12: pp. 15-38. 1982. ISSN: 0526-2623.

<<http://biblioteca2.uclm.es/biblioteca/ceclm/ARTREVISTAS/cem/CEM212Peinado.pdf>>

PEÑUELAS, J., PIÑOL, J., OGAYA, R. y FILELLA, I. (1997): "Estimation of plant water concentration by the reflectance water index". *International Journal of remote sensing* vol 18: pp. 2869 – 2875. 1997.

PÉREZ FERNÁNDEZ, F. (1958): "Daimiel, Geografía de un municipio manchego". *Publicaciones del Instituto de Estudios Manchegos*, Patronato José María Cuadrado, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Ciudad Real, 1958.

PONS, X., MORÉ, G. y SERRA, P. (2005): "Clasificador para series de imágenes destinadas a la obtención de mapas detallados de vegetación y cultivos". *Actas del XI Congreso Nacional de Teledetección*. Puerto de la Cruz, Tenerife, 2005.

POZO DE CASTRO, M. (1999): "Los usos del suelo en la gestión de los recursos hídricos mediante sistemas de teledetección". En BALLESTER *et al* (eds.): *Medida y -evaluación de las extracciones de aguas subterráneas*: pp. 105-124. Madrid, ITGE, 1999. ISBN: 84-7840-361-2.

PRICE, J.C. (1982): "Estimation of Regional Scale Evapotranspiration Through Analysis of Satellite Thermal-infrared Data". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-20, issue 3: pp. 286-292. 1982.

QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A., KERR, H. and SOROOSHIAN, S. (1994): "A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI)". *Remote sensing of environment* vol 48: pp. 119-126. 1994

QUINTANILLA, A., CASTAÑO, S., MONTESINOS, S., GARCÍA-CONSUEGRA, J. y NAVARRO, E. (1997): "Aproximación al estudio de la evolución temporal de la superficie en regadío en la cuenca del río Segura mediante técnicas de teledetección y SIG". En



*Teledetección: usos y aplicaciones*: pp. 39-46. Servicio de publicaciones de la Universidad de Valladolid, 1997. ISBN: 84-7762-693-6.

QUINTANILLA, A., MONTESINOS, S. y GARCÍA DE VICUÑA, A. (2005): "Teledetección, inventario y gestión del cultivo de la vid. Proyecto BACCHUS". *Actas del XI Congreso Nacional de Teledetección*. Puerto de la cruz (Tenerife), 2005.

RICHARDS, J.A. (1986). *Remote Sensing Digital Image Analysis. An introduction*. Springer-Verlag, 1986. ISBN: 0-387-58219-3.

RICHARDSON, A.J. and WIEGAND, C.L. (1977): "Distinguishing vegetation from soil background information". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol 43: pp. 1541 – 1552. 1977.

RIVAS MARTÍNEZ, S y cols. (1987). *Memoria del mapa de series de Vegetación de España*. Instituto para la conservación de la naturaleza (ICONA), 1987.

RODRÍGUEZ ESTEBAN, J.A., PÉREZ, M. y RODRÍGUEZ, J. (2003): "Análisis de los cambios espacio-temporales a partir de la creación de ortoimágenes del vuelo fotogramétrico de 1933". *Actas del VII Congreso de la AESIG*. Cáceres, 2003.

ROMERO, C. (1993). *Teoría de la Decisión Multicriterio: Conceptos, Técnicas y Aplicaciones*. Madrid, Alianza, 1993.

RONDEAUX, G., STEVEN, M. and BARET, F. (1996): "Optimization of soil adjusted Vegetation Indices". *Remote Sensing and Environment*, vol 55: pp. 95-107. 1996.

ROUSE, J. W., HAAS, R., SCHELL, J.A., DEERING, D.W. and HARLAN, J.C. (1974): "Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation". NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, 371. 1974.

RUBIO, E., ARTIGAO, M., CASELLES, V., COLL, C., y VALOR, E. (2001): "Cartografiado de la vid con datos Landsat-TM. Aplicación a una zona de Tomelloso (Ciudad Real)." *Revista de la Asociación Española de Teledetección* n. 15: p. 1-8. 2001.

RUEDA, F. (1992): "Las relaciones históricas hombre-agua en La Mancha". En Escuela Taller "Santa Clara": *La Mancha, un espacio del agua*, conferencias organizadas por el Módulo de Promoción y Desarrollo (1989-1992). Alcázar de San Juan, 1992.

RUIZ PULPÓN, A.R. (2009): "La Directiva Marco del agua como referencia para la aplicación del Plan Especial del Alto Guadiana." *Nimbus*, n. 23-24: pp. 183-200. 2009. ISSN: 1139-7136.

<[http://dialnet.unirioja.es/servlet/fichero\\_articulo?codigo=3126871&orden=0](http://dialnet.unirioja.es/servlet/fichero_articulo?codigo=3126871&orden=0)>

SAATY, T. (1980). *The analytical Hierarchy Process*. New York, McGraw Hill, 1980.

SAHUQUILLO, A., CUSTODIO, E. y LLAMAS, M.R. (2006): "La gestión de las Aguas subterráneas". *Informe del panel científico de seguimiento de las políticas de aguas de la Fundación para una Nueva Cultura del Agua*, 2006.



<<http://www.unizar.es/fnca/varios/panel/34.pdf>>.

SÁNCHEZ-SOLER, M.J. y DEL MORAL, A. (1992): "El Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel" En: *Guía de Espacios Naturales de Castilla La Mancha*. Servicio de Publicaciones de la Junta de Castilla La Mancha, 1992.

SANTESTEBAN, G., MIRANDA, C., FUENTEMILLA, M., TYSSERE, B., GUILLAUME, S. y ROYO, J.B. (2009): "Evaluación del interés del índice NDVI para la delimitación de unidades de manejo diferenciado dentro de una explotación vitícola". En MONTESINOS, S. y FERNÁNDEZ, L. (eds.): *Teledetección: agua y desarrollo sostenible*. Calatayud, AET, 2009.

SANZ, G.L. (1998). *La gestión del agua subterránea en la cuenca alta del río Guadiana: de la confrontación a la cooperación*. Diputación Provincial de Ciudad Real, Ciudad Real. 1998. ISBN: 84-7789-147-8.

SANZ, G.L. (1999): "Irrigated agriculture in the Guadiana River high basin (Castilla-La Mancha, Spain): environmental and socioeconomic impacts". *Agricultural Water Management* n. 40: pp.171-181. 1999.

SCHLAGER, E. & LÓPEZ-GUNN, E. (2006): "Collective systems for water management: is the tragedy of the common a myth?" In LLAMAS, M.R. & ROGERS, P. (eds): *Water crisis: Myth or Reality*, pp 43-58. Balkema, Ámsterdam, 2006.

SELLERS, P.J., DICKINSON, R.E., RANDALL, A., BETTS, A.K., HALL, F.G., BERRY, J. A., COLLATZ, G.J., DENNING, A.S., MOONEY, H.A., NOBRE, C.A., SATO, N., FIELD, C.B. and HENDERSON – SELLERS, A. (1997): "Modelling the Exchanges of Energy, Water and Carbon Between Continents and the Atmosphere". *Science*, n. 275: pp. 502-509. 1997.

SERNA, J. y GAVIRIA, M. (2005). *La quimera del agua. Presente y futuro de Daimiel y La Mancha Occidental*. Daimiel, Ayuntamiento de Daimiel, 2005. ISBN: 84-606-2334-3.

SGDGOH, Servicio Geológico de la Dirección General de Obras Hidráulicas. (1988). Evolución de las extracciones y niveles piezométricos en el acuífero de la Llanura Manchega. Estudio 06/88. Madrid, Ministerio de Obras Públicas y transportes, 1988.

SGOP, Servicio Geológico de Obras Públicas (1975). "Avance de los resultados obtenidos en el reconocimiento hidrogeológico de la zona de las Tablas de Daimiel". Estudio 12/75. MOPU, Madrid, 1975.

SGOP, Servicio Geológico de Obras Públicas (1977). "Los descensos de niveles piezométricos en la zona de Daimiel (Ciudad Real)" MOPU. Madrid, 1977.

SGOP, Servicio Geológico de Obras Públicas (1979). "La influencia en las Tablas de Daimiel de la extracción de aguas subterráneas en la Llanura Manchega". Estudio 11/79, MOPU. Madrid, 1979.

SGOP, Servicio Geológico de Obras Públicas (1982). “Estudio de la utilización conjunta de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca alta del río Guadiana”. Estudio 12/82, MOPU, 5 vol. Madrid, 1982.

SGOP, Servicio Geológico de Obras Públicas (1983). “Estudio de la explotación de aguas subterráneas en las proximidades del Parque nacional de Las Tablas de Daimiel y su influencia sobre el soporte hídrico del ecosistema”. Estudio 12/83, MOPU. Madrid, 1983.

SGOP: SERVICIO GEOLÓGICO DE OBRAS PÚBLICAS. (1991). *Evolución de las extracciones y niveles piezométricos de la Llanura Manchega y del Campo de Montiel*. Estudio con referencia 05/91. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid, 1991.

SIMONNEAUX, V., DUCHEMIN, B., HELSON, D., ER-RAKI, S., OLIOSO, A. and CHEHBOUNI, A. (2008): “The use of high-resolution image time series for crop classification and evapotranspiration estimate over an irrigated area in central Morocco”. *Remote Sensing of Environment*, vol 95, issue 3: pp. 317-341. 2008.

SIMS, D.A. and GAMON, J.A. (2003): “Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features”. *Remote Sensing of Environment* vol 84, issue 4: pp. 526-537. 2003.

SMITH, L.C. (1997): “Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: A review”. *Hydrological processes: Special Issue on remote sensing*, vol. 11, n. 10: pp. 1427-1439, 1997.

SMITS, P.C., DELLEPIANE, G. and SCHOWENGERDT, R.A. (1999): “Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: a review and a proposal for a cost-based approach”. *International Journal of Remote Sensing*, vol 20, issue 8: pp. 1461-1486. 1999.

STEVEN, M.D. and CLARK, J.A. (1990). *Applications of remote sensing in agriculture*. Nottingham, Butterworths press, 1990. ISBN: 0-408-04767-4.

SUÁREZ, L., ZARCO-TEJADA, P.J., BERNI, J.A., GONZÁLEZ-DUGO, V., FERRERES, E. (2009): “Modeling PRI for Water Stress Detection using Radiative Transfer Models”. *Remote Sensing of Environment*, vol 113: p 730-744. 2009.

THENKABAIL, P.S. GAMAGE, M. and SMAKSHTIN, V.U. (2004). *The use of remote sensing data for drought assessment and monitoring in Southwest Asia*. Colombo: Sri Lanka, International Water Management Institute, Research Report 85, 2004.

THENKABAIL P.S., SCHULL, M. and TURRAL, H. (2005): “Ganges and Indus river basin land use/land cover (LULC) and irrigated area mapping using continuous streams of MODIS data”. *Remote sensing of environment*, vol 95, n. 3: pp. 317-341. 2005. ISSN 0034-4257

- THENKABAIL, P.S., BIRADAR, C.M., TURRAL, H., NOOJIPADY, P., LI, Y.J., VITHANAGE, J., DHEERAVATH, V., VELPURI, M., SCHULL, M., CAI, X.L., and DUTTA, R. (2006): "An Irrigated Area Map of the World (1999) derived from Remote Sensing". *Series IWMI, Research Report 105*. International Water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka, 2006.
- THOMAS, I.L. (1987). *Classification of remotely sensed images*. Adam Hilger Press, 1987. ISBN: 0-85274-496-X.
- THOMASSON, J.A. (2003): "Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications". In HELDMAN D.R. (ed.): *Encyclopedia of Agricultural, Food, and Biological Engineering*. Taylor & Francis, 2003. ISBN: 978-0-8247-0938-9 (hardback) 978-0-8247-0937-2 (electronic).
- TSO, B. and MATHER, P.M.. (2001). *Classification Methods for Remotely Sensed Data*. Taylor and Francis, New York, 2001.
- UE – Unión Europea. *Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Directiva Marco del Agua*. 2000.
- US NATIONAL RESEARCH COUNCIL: Committee on the Earth System Science for Decisions About Human Welfare. Board on Earth Science and Resources. (2007). *Contributions of Land Remote Sensing for decisions about food security and human health: Workshop report*. Washington, National Academies Press, 2007. ISBN: 978-0-309-10295-7. <[http://books.nap.edu/catalog.php?record\\_id=11759](http://books.nap.edu/catalog.php?record_id=11759)>
- VARELA, J. (2007). *Aves Amenazadas de España*. Barcelona, Lynx Edicions, 2007.
- VELA, A. (2001). *Desarrollo de un modelo de balance de agua en los suelos de Castilla La Mancha*. Colección tesis doctorales n. 115. Servicio de Publicaciones de Castilla La Mancha, 2001. Tesis doctoral. ISBN: 84-8427-100-5.
- VELASCO, M., (2005). *100 años en el desarrollo de la cuenca alta del río Guadiana (1898-1998)*. Consejo Económico y Social de Castilla La Mancha, Colección Tesis, nº 1. 2005. ISBN: 84-609-5499-4. Tesis doctoral.
- VELAYOS, M. (1983). *Contribución al estudio de la flora y de la vegetación de las Lagunas de Ruidera y su entorno*. Universidad Complutense, 1983. Tesis Doctoral.
- VILLARROYA, F., (2006): "Historia hidrogeológica del acuífero 23: de la noria a la bomba. (Hacia una gestión adaptable del acuífero)". Informe del proyecto Newater. 2006.
- VILLARROYA, F., y MARTÍNEZ-SANTOS, P. (2007): "Los problemas hidrológicos y ambientales de la cuenca alta del Guadiana". Conferencias de la VII Semana de la Ciencia de la Comunidad de Madrid. 2007.

VOOGD, H. (1983). *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. London, Pion eds, 1983.

YANG, L., WYLIE, B.K., TIESZEN, L.L. and REED, B.C. (1998): "An analysis of Relationships among Climate Forcing Time-Integrated NDVI of Grasslands over the U.S. Northern and Central Great Plains". *Remote Sensing of Environment*, vol 65. 1998.

ZARCO-TEJADA, P.J., RUEDA, C.A. and USTIN, S.L. (2003) "Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion methods". *Remote Sensing of Environment*, vol 85, issue 1: pp. 109-124. 2003.

ZHANG, N., WANG, M. and WANG, N. (2002): "Precision agriculture – a worldwide overview". *Computer and Electronics in Agriculture*, vol 36: pp. 113-132. 2002.



## **LISTADO DE ABREVIATURAS**





## LISTADO DE ABREVIATURAS

AcSE	Acuíferos SobreExplotados
ARM	Orden del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino
CA	Comunidad Autónoma
CAG	Cuenca Alta del Guadiana
CE	Comisión Europea
CEE	Comunidad Económica Europea
CHG	Confederación Hidrográfica del Guadiana
CUAS	Comunidades de Usuarios de Aguas Subterráneas
DMA	Directiva Marco del Agua
DOCM	Diario Oficial de Castilla la Mancha
DT	Disposición Transitoria
EMC	Evaluación MultiCriterio
ESA	European Space Agency – (Agencia Espacial Europea)
ESYRCE	Encuesta sobre Superficies Y Rendimientos de Cultivos en España
GAEC	Good Agricultural and Environmental Conditions – (Buenas condiciones agrícolas y ambientales)
GCP	Ground Control Points (Puntos de control)
GPS	Global Positioning System – (Sistema de Posicionamiento Global)
ICONA	Instituto para la Conservación de la Naturaleza
IFOV	Instantaneous Field of View – (Campo de visión instantánea)
IGME	Instituto Geológico y Minero de España
INC	Instituto Nacional de Colonización
INE	Instituto Nacional de Estadística
IRYDA	Instituto Nacional de Reforma Y Desarrollo Agrario
ISA	Informe de Sostenibilidad Ambiental
ITGE	Instituto Tecnológico y Geominero de España
IV	Índice de Vegetación

IWMI	International Water Management Institute – (Instituto Internacional para la Gestión del Agua)
JCCM	Junta de Comunidades de Castilla La Mancha
LA	Ley de Aguas
LAI	Leaf Area Index – (Índice de Área Foliar)
LIC	Lugar de Importancia Comunitaria
LMI	Leaf Moisture Index
LUE	Light Use Efficiency – (Eficiencia en el Uso de la Luz)
MARM	Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino
MIMAM	Ministerio de Medio Ambiente
MOPTMA	Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index
NASA	National Aeronautics and Space Administration – (Agencia Espacial de los Estados Unidos)
NDVI	Normalised Difference Vegetation Index – (Índice de diferencia de vegetación normalizado)
NDWI	Normalised Difference Water Index
PAC	Política Agraria Común
PDLS	Plan de Desarrollo Local Sostenible
PEAG	Plan Especial del Alto Guadiana
PHN	Plan Hidrológico Nacional
PNOA	Plan Nacional de Ortofotografía Aérea
PNT	Plan Nacional de Teledetección
PO	Plan de Ordenación de las Extracciones
PS	Perímetro de Sobreexplotación
PVI	Perpendicular Vegetation Index – (Índice perpendicular de vegetación)
PWI	Plant Water Index
ROC	Relative Operating Characteristic
RVI	Ratio Vegetation Index
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SGOP	Servicio Geológico de Obras Públicas

SIAR	Sistema de Información para el Asesoramiento del Riego
SIG	Sistema de Información Geográfica
SIGA	Sistema de Información Geográfico Agrario
SIOSE	Sistema de Información sobre la Ocupación del Suelo en España
TRLA	Texto Refundido de la Ley de Aguas
TSAVI	Transformed Soil Adjusted Vegetation Index
RD	Real Decreto
RDL	Real Decreto Legislativo
RDPH	Reglamento del Dominio Público Hidráulico
UE	Unión Europea
UH	Unidad Hidrogeológica
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
UTM	Universal Transverse Mercator
ZEC	Zona de Especial Conservación
ZEPA	Zona de Especial Protección para las Aves
ZR	Zona Regable

